

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE EN GENIE MECANIQUE
OPTION : ENERGETIQUE**

Intitulé du sujet:

Simulation numérique d'une serre de culture refroidie en milieu sec et chaud.



Etudié par : M. BELKESSA Lyes

Devant le jury composé de :

**M. MAKHLOUF. S
M. NEBALLI. R
M. DJEBOURI. H**

**Président
Promoteur
Examineur**

Soutenu le 21/11/2017

Promotion 2016-2017

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier infiniment le bon Dieu pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il m'a accordés tout au long de mes études.

Mes premiers remerciements vont à mes chers parents que Dieu les protège. Je présente mes sincères remerciements avec profonds respects à mon promoteur

M.R. NEBBALI pour son suivi, sa patience, ses conseils et son aide, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant toute la durée de nos études.

Je remercie aussi les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, que dieu les protège.

A mes grands parents

A mes frères

A tous mes amis sans exception.

Symboles	Désignations	Unités
a	azimut solaire	(°).
as	albédo du sol.	/
av	albédo des végétations.	/
β_h	Angle que font la couverture et l'horizontale	(Radian).
β	Coefficient de dilatation du fluide	(C ⁻¹).
C _p	Chaleur massique de l'eau	(J/kg°C).
C ₀	la vitesse de la lumière dans le vide	(m/s).
C	Capacité thermique	(J/K).
D _v	diamètre des végétations (=largeur d'un rang)	(m).
D _f	dimensions moyenne d'une feuille de végétation	(m).
D	rayonnement diffus	(W/m ²).
d	est l'épaisseur du matériau	(m).
E	est la correction de l'équation de temps en heurs	(h).
e	Epaisseur du matériau de couverture	(m).
ETPs	Evapotranspiration potentielle sous serre	(mm / jour).
ETR	Le flux de vapeur d'eau.	/
F _{i,j}	facteur de forme.	/
f	fonction à déterminer expérimentalement.	/
g	L'accélération du fluide	(m/s ²).
H	hauteur de la serre.	(m).
H _v	hauteur des végétations.	(m).
h _s	la hauteur du soleil	(°).
h _c	coefficient de transfert de chaleur par convection	(W /m ² °C ¹).
h _n	coefficient convectif naturel	(W/m ² °C).
h _f	coefficient d'échange convectif forcé	(W/m ² °C).
h _t	coefficient d'échange turbulent pour la vapeur d'eau	(W/m ² °C).
h _{ci}	coefficient d'échanges superficiels	(W/m ² °C).
h _l	coefficient d'échange de chaleur latente	(W/m ² °C).
I ₀	la constante solaire	(W . m ⁻²).
h	L'angle d'incidence du rayonnement direct	(°).
j	le numéro du jour de l'année.	/

Nomenclature

K	coefficient global de transmission thermique	(W/m ² . °C).
Ke	coefficient d'extinction	(cm ⁻¹).
L _v	chaleur latente de vaporisation	(J/kg).
L _s	longueur de la serre	(m).
L	la longueur caractéristique de la surface	(m).
m	le numéro du moins de l'année.	/
nrang	nombre de rang des végétations.	/
np	la normale au plan.	/
n	indice de réfraction.	/
P _v	pression de vapeur d'eau.	(Pa).
Pa	pression atmosphérique	(Pa).
P _{vs}	pression de vapeur saturante.	(pa).
Q	énergie rayonnée (émittance)	(W/m ²).
Q _c	puissance absorbée par la paroi (couverture)	(W).
Q _p	puissance absorbée par les plantes	(W).
Q _s	puissance absorbée par le sol	(W).
Q _{ren}	flux du au renouvellement de l'air sec	(W).
Q _r	la puissance radiative	(W).
Q _{Ren}	la puissance de renouvellement de l'air sec	(W).
Q _{i Ren}	la puissance de renouvellement de l'air humide	(W).
Q ETP	la puissance de l'évapotranspiration des plantes	(W).
Q _{cond}	la puissance conductive	(W).
R _g	rayonnement solaire global	(W/m ²).
R _{gs}	rayonnement global sous serre	(kJ / m ² . Jour).
R	taux de renouvellement de l'air intérieur	(h ⁻¹).
ra	résistance aérodynamique.	/
S	surface	(m ²).
TSV	temps solaire vrai	(h).
t	temps	(s).
U	humidité relative	(%).
U _m	la vitesse moyenne du déplacement de l'air intérieur	(m/s).
uf	vitesse du fluide	(m/s).

Nomenclature

u	vecteur unitaire de la direction.	/
V	vitesse du vent	(m/s).
V_{aint}	volume de l'air intérieur	(m ³).
V_h	vitesse à hauteur h	(m/s).
V_s	volume de la serre	(m ³).
W	l'humidité spécifique de l'air	(kg _{air sec} /kg _{eau}).
x	variable d'espace dans la direction du flux.	(m).

Symboles Grecs

α	facteur d'absorption	/
δ	Déclinaison	(°).
δ_r	angle de diffraction	(°).
ω	angle horaire	(°).
ε	émissivité.	/
λ	Conductivité thermique	(W/ m. K).
ρ	facteur de réflexion	/
ρ_a	la masse volumique de l'air	(kg /m ³).
ρ_e	masse volumique de l'eau	(kg /m ³).
τ_a	est le coefficient d'atténuation.	/
τ	coefficient de transmission de couverture	(%).
τ_g	facteur de transmission dans le global	(%).

Nombres adimensionnels

Gr Nombre de Grashof.

Pr Nombre de Prandtl.

Nu Nombre de Nusselt.

Re Nombre de Reynold.

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : serres de cultures

1. Introduction :.....	2
2. Définition d'une serre agricole :.....	2
3. Les différents types de serres :.....	2
3.1. Serre Chapelle :.....	2
3.2. Serre Tunnel :.....	3
3.3. Serre Venlo :.....	3
3.4. La serre bioclimatique (chinoise) :.....	4
4. Le climat sous serre :.....	5
4.1. La lumière :.....	5
4.2. La température :.....	6
4.3. L'humidité :.....	6
4.4. L'effet de serre :.....	6
4.5. Le dioxyde de carbone :.....	7
4.6. Le vent :.....	7
4.7. L'orientation des serres :.....	8
5. Modes de climatisation des serres :.....	8
5.1. Chauffage par des conduits :.....	8
5.2. Chauffage racinaire :.....	11
5.3. Chauffage du sol :.....	11
5.4. Production d'air chaud :.....	12
5.4.1. Aérothermes :.....	13
5.4.2. Générateurs d'air chaud :.....	14
5.5. Refroidissement et humidification des serres :.....	15
5.5.1. Ventilation.....	16
5.5.2. Cooling system :.....	17
5.5.3. Nébulisation fine :.....	18
6. Conclusion :.....	18

Chapitre II : bilans thermiques et massiques

1. Introduction :.....	19
2. Echanges de chaleur par rayonnement :.....	19

a) Rayonnement de courte longueur d'onde :	19
b) Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes :	20
3. Echanges de chaleur par conduction :	20
4. Echanges de chaleur par convection :	21
4.1. Convection naturelle (libre) :	21
4.2. Convection forcée :	22
4.3. Convection mixte :	22
5. Quantification des échanges convectifs dans une serre :	23
5.1. Echange convectif entre la surface du sol et l'air intérieur :	24
5.2. Echange convectif entre la couverture et l'air extérieur :	25
5.3. Echange convectif entre la végétation et l'air intérieur :	25
6. Bilans radiatifs :	26
6.1. Rayonnement de courte longueur d'onde (CLO) :	26
6.2. Rayonnement solaire :	27
6.2.1. Composante directe :	27
6.2.2. Composante diffuse :	28
6.3. Rayonnement de grande longueur d'onde (GLO) :	29
6.3.1. Echange radiatif entre la voûte céleste et le toit de la serre :	29
6.3.2. Echange radiatif entre la végétation et la couverture (toit) :	30
6.3.3. Echange radiatif entre la végétation et la paroi Sud :	30
6.3.4. Echange radiatif entre la végétation et la paroi Nord :	30
6.3.5. Echange radiatif entre la végétation et la paroi Est :	30
6.3.6. Echange radiatif entre la végétation et la paroi ouest :	30
6.3.7. Echange radiatif entre la surface du sol de la serre et la végétation :	31
6.3.8. Echange radiatif entre la surface du sol de la serre et le toit de la serre :	31
7. Puissance échangée par évaporation / condensation :	31
a) Du côté intérieur (au niveau des parois avec l'air intérieur) :	31
b) Du côté extérieur (au niveau des parois avec l'air extérieur) :	32
7.2. Evaporation et évapotranspiration :	32
7.3. Condensation :	33
8. Bilans énergétiques :	34
8.1. Bilan d'énergie du toit de la serre :	35
8.2. Bilan d'énergie du sol intérieur :	35
8.3. Bilan d'énergie de la paroi EST :	36
8.4. Bilan d'énergie de la paroi OUEST :	37

8.5. Bilan d'énergie de la paroi SUD :	37
8.6. Bilan d'énergie de la paroi NORD :	38
9.conclusion :	39

Chapitre III : simulation des écoulements de l'air refroidi dans la serre

1. Introduction :	40
2. Position du problème :	40
3. Description de la serre étudiée :	41
4. Simulations :	41
4.1. Maillage du domaine :	41
4.2. Conditions aux limites :	42
5. Résultats :	42
5.1. Climat intérieur :	42
5.2. Climat distribué dans la serre :	44
5.3. Influence du nombre d'humidificateurs :	51

Introduction générale

Les serres agricoles s'apparentent de plus en plus à des structures industrielles dont l'architecture et les performances doivent être optimisés pour assurer une rentabilité face aux coûts d'investissement qu'elles représentent. Optimiser et gérer le climat de la serre a pour objectif de faire disparaître les facteurs limitant la production. La croissance du plant abrité dépend de la température de l'air intérieur de la serre, ce qui implique tantôt du chauffage, tantôt de la ventilation, tantôt de la déshumidification selon la saison. Le refroidissement de l'ambiance de la serre agricole en périodes chaudes, est délicat. Il est réalisé par aération naturelle, ou dynamique, par réfrigération évaporative et par ombrage.

Les serres sont largement utilisées dans le monde, surtout dans le bassin méditerranéen et le Sud Algérien.

L'étude et la modélisation du microclimat de la serre (température, humidité, évapotranspiration, condensation, échange convectif et radiatif, et ventilation) est un moyen indispensable pour contrôler les paramètres climatiques de la serre. Chaque paramètre peut jouer un rôle essentiel, car il permet : de réguler la température dans la serre, de limiter l'humidité de l'air, d'assurer l'alimentation des plantes en dioxyde de carbone et de limiter le développement de pathologies fongiques.

L'objectif de ce travail, est justement de simuler la distribution du climat dans une serre refroidie par humidification de l'air.

Pour ce faire, on s'est intéressé, au chapitre I, aux éléments qui conditionnent le climat interne d'une serre de culture. Au chapitre II, on a effectué les bilans thermiques, associés aux éléments constituant la serre (parois et surface du sol). Les flux de chaleur nets sont alors introduits comme des termes sources pour simuler les échanges aérauliques qui ont lieu dans une serre vide, ce qui a fait l'objet du chapitre III.

Chapitre I : Serres de cultures

1. Introduction

La culture sous abris est devenue un instrument ordinaire de notre approvisionnement en produit frais. Quelle que soit l'optique choisie : économique, sociale ou écologique, la production locale apparaît plus sensée que l'importation de régions lointaines, lorsqu'il s'agit de produits cultivés sous abris. Cela étant, l'exploitation raisonnée des infrastructures impose, sous nos climats, le refroidissement quasi continu des serres pour une production en presque toutes les saisons.

Le mode de culture approprié à cette situation est appelé la serriculture, il fait appel à plusieurs éléments constitutifs d'un agro-système qui génère un microclimat assurant la protection et le déroulement normal de la croissance des plantes.

2. Définition d'une serre agricole

La serre est une construction destinée à abriter des cultures et des plantes ornementale, légumiers ou fruitières, et parfois dans un but expérimental ou didactique de toutes autres plantes, dans des conditions plus favorables ou plus sûres qu'en plein air.

La définition de la norme française NF U57-001, déc.1984 décrit la serre comme « une enceinte destinée à la culture ou à la production des plantes en exploitant le rayonnement solaire. Les dimensions de cette enceinte permettent à un homme de travailler aisément à l'intérieur ». [1]

Cette structure protège les plantes grâce à une maîtrise du climat qui permet d'obtenir des conditions optimales de croissance ou en minimisant les risques sanitaires. L'exploitation du rayonnement solaire directement par les mécanismes de photosynthèse, mais aussi à travers le phénomène de l'effet de serre contribue à la bonne croissance de la plante.

3. Les différents types de serres

La classification des serres est très complexe est plus difficile, elle est souvent faite selon les formes données par les cadres porteurs qui constitue l'assemblage.

3.1. Serre Chapelle

La serre chapelle est un type de serres dont la popularité reste intacte. Cette serre a fait ses preuves mondialement, notamment pour des applications spécifiques pour les producteurs de plantes en pot, les exploitations horticoles et les entreprises de culture sélective. De nombreux

cultivateurs choisissent cette serre pour son rendement élevé en luminosité et sa flexibilité pour passer d'une culture à une autre [1].



Figure (I.1) : serre chapelle.

3.2. Serre Tunnel

La serre Tunnel est spécialement dédiée aux cultures précoces. Elle est un incontournable pour le potager puisqu'elle permet de prolonger la récolte de fruits et légumes hors saison, voire de permettre des floraisons d'été.

Elle doit son nom à sa forme demi-circulaire. Sa structure se maintient grâce à de grands arceaux métalliques. Elle est recouverte d'une bâche plastique spécialement conçue pour les serres. Cette bâche de serre souple et transparente permet de doubler l'efficacité de la serre [1].



Figure (I.2) : représentation d'une serre Tunnel

3.3. Serre Venlo

La serre Venlo est de longue date la serre la plus utilisée dans le secteur de la production horticole. La serre Venlo doit cette popularité à son rendement élevé en luminosité, grâce à la limitation maximale des parties qui interceptent la lumière. Elle peut être utilisée pour de nombreuses applications, aussi bien pour la culture des légumes, et la culture des fleurs.

C'est aussi le type de serres qui a subi le plus de transformations au cours des décennies. Les serres Venlo contemporaines sont des serres de pointe qui offrent de vastes possibilités en matière de développements technologiques modernes.

Grâce à la multitude de modèles, il est toujours possible de trouver une solution idéale, également d'un point de vue de l'efficacité de l'utilisation de l'espace. La flexibilité en matière de hauteur des pieds, et de dimensions de chapelle et de travée permettent d'adapter la serre à l'utilisation visée, y compris l'aménagement de locaux techniques correspondants [1].

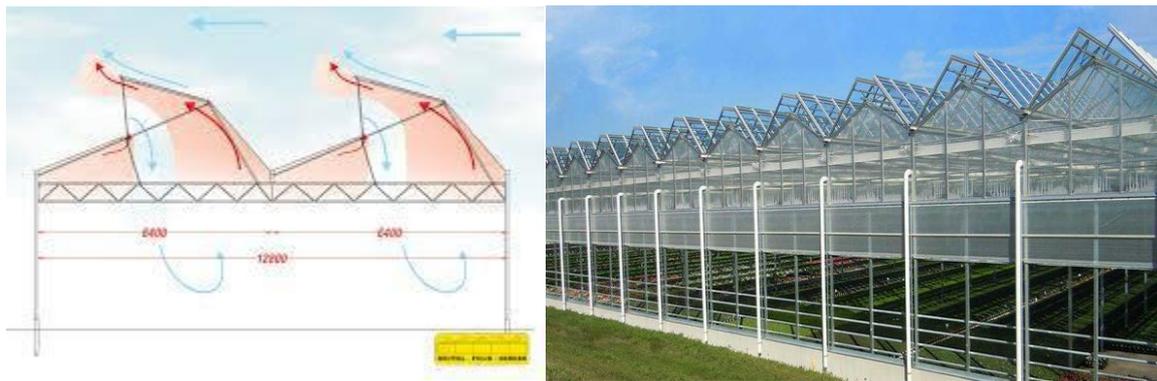


Figure (I.3) : représentation serre Venlo.

3.4. La serre bioclimatique (chinoise)

La serre bioclimatique est une structure qui s'inscrit dans une démarche environnementale et durable. Comme le terme l'indique, la serre bioclimatique utilise les variations du climat : son fonctionnement suit les variations environnementales et climatiques pour assurer un chauffage et une régulation naturelle de la structure.

Concrètement, la serre bioclimatique se chauffe grâce aux rayons du soleil : construite à l'aide de matériaux favorisant la captation, l'isolation et la conservation de la chaleur extérieure, la serre bioclimatique est aussi appelée aussi serre solaire passive.

La climatisation interne est également basée sur une circulation naturelle de l'air : l'énergie solaire emmagasinée le jour est restituée la nuit.

L'orientation idéale pour une telle serre est le sud. Lors de la construction de la serre bioclimatique, certains principes sont à respecter tels que les vitrages verticaux, indispensables pour attirer les rayons solaires en hiver et préserver la fraîcheur l'été.

Une serre bioclimatique permet d'allonger d'environ 1 mois la période de production des fruits et légumes, et autres espèces cultivées à l'intérieur de la serre [1].

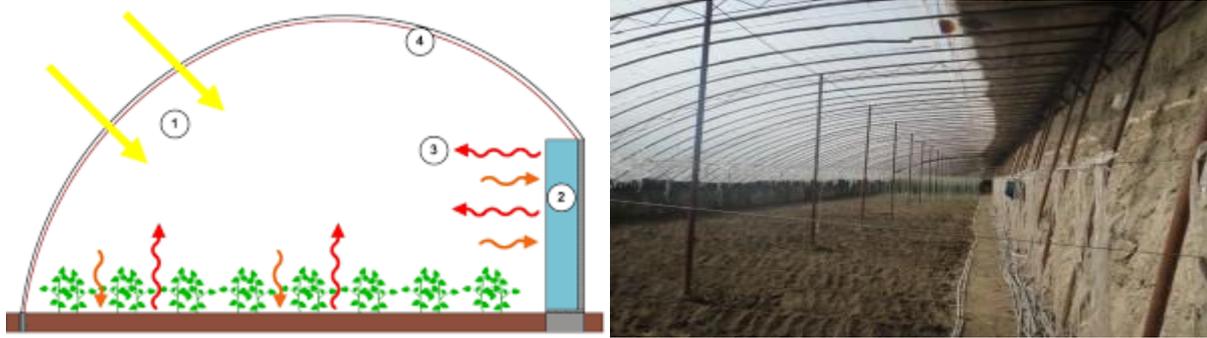


Figure (I.3) : représentation d'une Serre bioclimatique.

4. Le climat sous serre

Le climat est un facteur essentiel de l'activité physiologique des plantes. L'énergie du rayonnement solaire fixée sous forme chimique par les végétaux chlorophylliens est, à de rares exceptions près, la seule source primaire d'énergie en biologie.

L'environnement de la serre est représenté par un groupe de valeurs moyennes spatiales des facteurs climatiques, telles que la radiation, la température, l'humidité et la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) qui affecte l'augmentation et le développement de la plante.

L'environnement ainsi créé et contrôlé est connu sous le nom de microclimat de serre [2]. Les paramètres influençant ce climat sont :

4.1. La lumière

Les conditions d'éclairement sous la serre sont étroitement liées à l'éclairement naturel avec surtout une réduction quantitative de l'énergie solaire reçue et une légère modification qualitative plus ou moins importante selon les matériaux employés et aux conditions de leur mise en œuvre (la forme, le volume de l'abri, son orientation, sa structure, etc.).

Il dépend aussi du climat extérieur et des caractéristiques de l'air et surtout les qualités physiques des matériaux de couverture. Dans le tableau (I.1), on recense la transmission optique des principaux matériaux utilisés [2].

Tableau (I.1) : Caractéristique optique de transmission des matériaux de couverture [2].

Matériaux	Rayonnement solaire	Infrarouge thermique
Verre	0.90	0
P.V.C	0.80	0.30
E.V. A	0.80	0.60
Polyéthylène	0.80	0.80

4.2. La température

La température de l'air dans la serre est le résultat du bilan énergétique de l'abri.

L'effet de serre a généralement les conséquences suivantes :

- **De nuit** : du fait de la réduction des pertes par rayonnement infrarouge, les températures minimales sont plus élevées qu'à l'extérieur. Cependant, par nuit claire, il peut se produire des inversions de températures, c'est-à-dire des abaissements plus marqués qu'en plein air.
- **De jour** : du fait du piégeage de l'énergie solaire et de la réduction des échanges convectifs, les températures de l'air sont beaucoup plus élevées qu'à l'extérieur et deviennent excessives lorsque le rayonnement est intense, en l'absence d'une ventilation [2].

4.3. L'humidité

Le confinement et l'étanchéité de la serre favorisent l'augmentation de l'humidité absolue. La vapeur d'eau produite par les plantes est évacuée soit par renouvellement d'air, soit condensée au niveau des parois et sur la végétation lorsque la température de ces deux surfaces est inférieure à celle du point de rosée.

- **Pendant la nuit** : les serres étant généralement fermées, à cause de l'humidité relative élevée, et des basses températures, il se produit fréquemment des condensations sur les parois et sur la végétation (conditions favorables à certaines maladies cryptogamiques).
- **Pendant le jour** : l'humidité absolue augmente avec la transpiration mais l'élévation de la température de l'air peut entraîner un abaissement exagéré de son humidité relative et peut provoquer un véritable stress hydrique au niveau de la végétation [2].

4.4. L'effet de serre

L'énergie solaire qui pénètre dans la serre est absorbée par les plantes, le sol et les différentes structures. Les parois ne laissant pas, en partie, sortir les rayonnements infrarouges longs, il en résulte que l'énergie solaire est piégée par la serre, c'est "l'effet de serre". Cet effet est favorable au maintien ou à l'élévation des températures de l'air et du sol lorsque les températures extérieures sont trop basses.

Mais, en été, lorsque les températures extérieures sont élevées, cet effet devient défavorable. L'effet de serre peut être considéré comme la somme de deux phénomènes [2] :

- Le piégeage du rayonnement de grande longueur d'onde (GLO) par le matériau de couverture. Il est d'autant plus important que le matériau est plus opaque aux GLO.
- L'effet de confinement de la masse d'air contenue dans le volume de la serre, dont les échanges thermiques avec l'extérieur sont fortement ralentis à cause des parois [2].

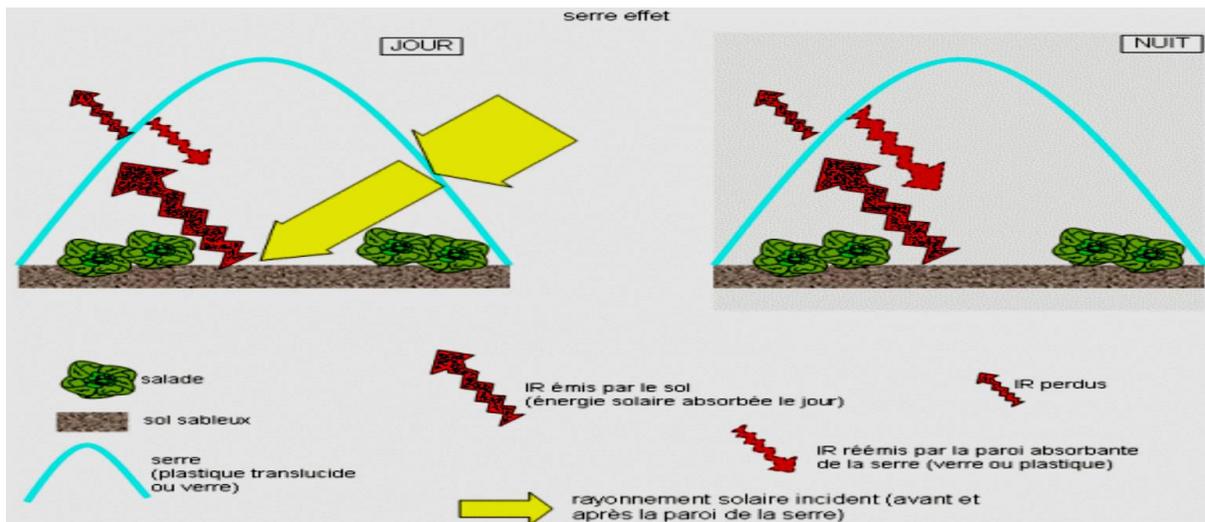


Figure (I.4) : représentation des différents échanges radiatif.

4.5. Le dioxyde de carbone

Dans les cas des serres très étanches peu aérées, il est souhaitable de pouvoir réaliser un enrichissement en CO₂ qui peut être très bénéfique, aussi bien pour le rendement que pour la précocité s'il est judicieusement utilisé.

Dans les régions méridionales, où les besoins de la ventilation sont importants dès le début de la saison de culture et où les serres sont donc ouvertes pendant la majeure partie de la journée, l'enrichissement en CO₂ est difficilement applicable [2].

4.6. Le vent

Le vent est considéré comme un déplacement d'air s'effectuant surtout horizontalement. Ce déplacement peut être caractérisé par sa vitesse et sa direction.

Dans les stations météorologiques, la vitesse et la direction sont mesurées à dix mètres au-dessus du sol.

Il est possible de calculer la vitesse moyenne à une hauteur h au-dessus du sol en connaissant la vitesse de référence à 10 m (selon la formule d'Hellman) [3].

$$V_h = V_{10} [0,233 + 0,656 \log_{10} (h + 4,75)]. \text{ (m/s)} \quad (I.1)$$

Avec : V_h = vitesse à hauteur h

V₁₀ = vitesse à 10 m.

4.7. L'orientation des serres

Le choix de l'orientation d'une serre se fait en tenant compte de l'éclairement naturel solaire, de type de serre, de la direction du vent dominant et des caractéristiques particulières du terrain, il est difficile d'éviter l'existence d'une hétérogénéité climatique à l'intérieur de la serre (la répartition de la lumière dans la serre est hétérogène).

Le sud est beaucoup plus éclairé et cela d'autant plus que le matériau de couverture est plus diffusant, la répartition est également hétérogène dans le temps avec une accentuation du maximum à midi.

Une orientation Nord-Sud va capter plus de lumière de fin mars à septembre, avec une répartition plus homogène, cette orientation (Nord-Sud) a l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques. [2]

5. Modes de climatisation des serres

La maîtrise des températures et celle de l'hygrométrie à l'intérieur des serres sont traitées ensemble, car il est impossible de faire varier l'un des deux paramètres sans faire varier l'autre. Le chauffage a un effet déshumidifiant, l'aération a un effet rafraichissant et déshumidifiant, et l'humidification de l'air a un effet rafraichissant.

5.1. Chauffage par des conduits

Les thermosiphons dominent dans les serres les plus perfectionnées. Dans les thermosiphons traditionnels, de l'eau circule à haute température, entre 50 et 80°C, à travers des tuyaux en bardage, où longeant les rangs de culture, en les cintrant ou en passant en leur milieu, à une hauteur de 30cm à 1m au-dessus du sol (fig. a, b et c). Des tuyaux, de section éventuellement plus faible, peuvent être placés au-dessus des rangs de culture, contribuant au réchauffement des « têtes » (fig. d), mais leur efficacité thermique n'est pas bonne, car ils rayonnent vers le toit de la serre. Ils doivent donc être associés à des écrans thermiques. Ces tuyaux aériens sont aussi responsables d'ombres portées importantes. Mais ils peuvent être utilisés pour faire fondre la neige lorsque celle-ci s'accumule dans les chéneaux. [1]

Les tuyaux sont soit soutenus par des chaînes, soit supportés au niveau des piédroits, soit posés au sol dans les allées. Dans ce dernier cas, les deux tuyaux longeant chacun un côté de rang de culture constitue des rails utilisables pour guider des chariots de récolte, des dispositifs automatiques de traitement phytosanitaire. Leur proximité de la surface du sol contribue également au chauffage des racines. (figure c et d) [1]

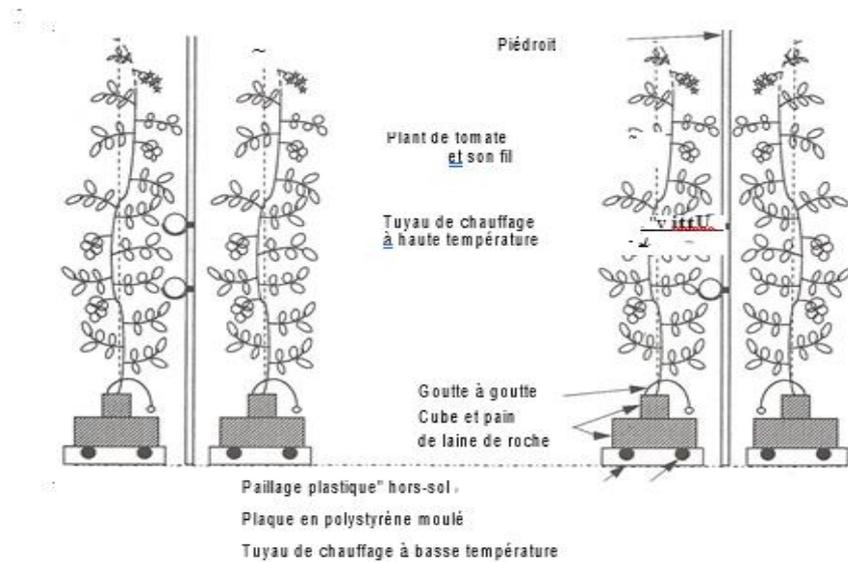


Figure (a) : Chauffage aérien par thermosiphon associé à du chauffage racinaire par un circuit à basse température.

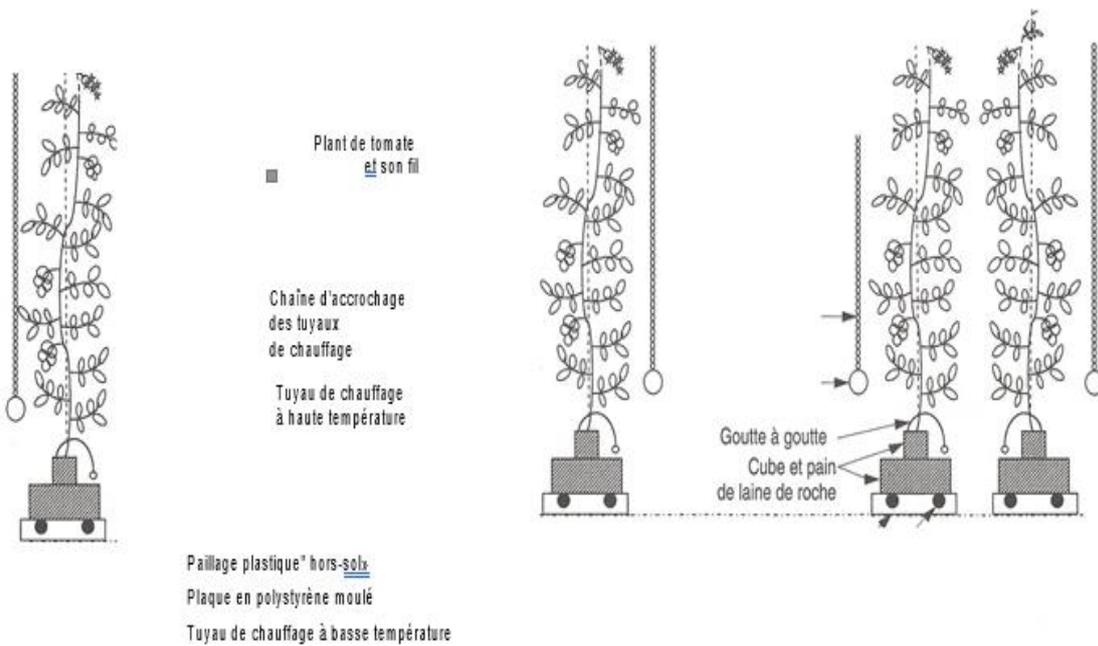


Figure (b) : chauffage par thermosiphon avec tuyaux de chauffage aérien suspendus.

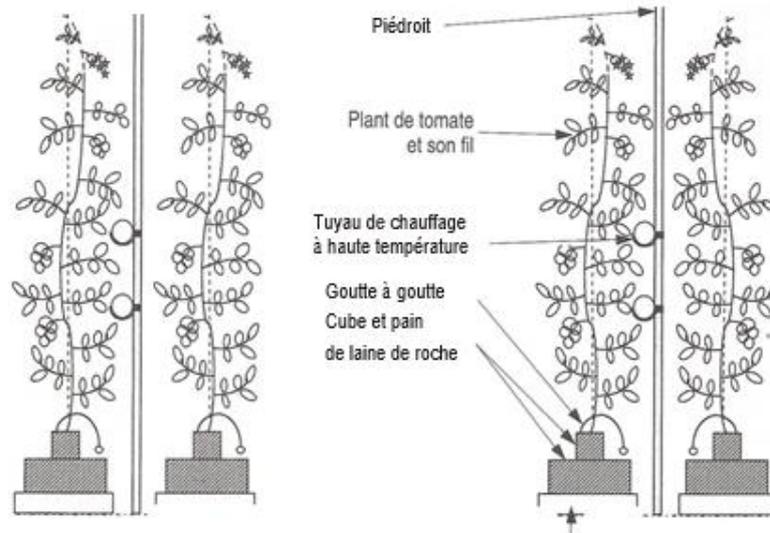


Figure (c) : chauffage par thermosiphon avec chauffage racinaire assuré par des tuyaux à haute température utilisés comme rails dans les allées.

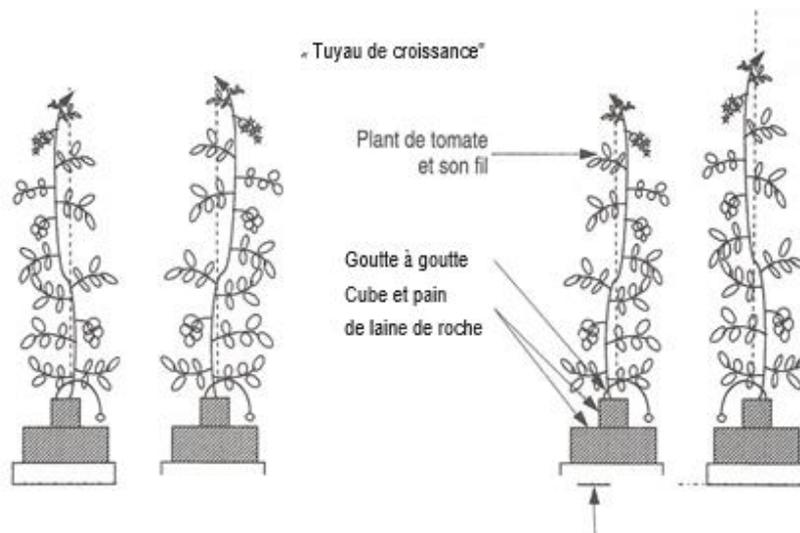


Figure (d) : chauffage par thermosiphon avec chauffage aérien assuré par des « tuyaux de croissance ».

Les tuyaux sont généralement de section circulaire ou, parfois carrée. Les thermosiphons permettent d'atteindre des puissances de chauffage élevées. Sa grande inertie thermique est un avantage en cas de panne, mais elle est à l'origine de temps de réponse longs dont le producteur doit tenir compte. [1]

Pour les tuyaux, l'acier domine mais l'aluminium fait une percée intéressante. Quoique plus cher, il offre l'avantage d'être plus léger. Les tuyaux en aluminium peuvent être montés sur chaîne relevable, ce qui autorise un ajustement commode de leur hauteur en fonction de celle

des cultures. En production de plantes en pots et en pépinière, le relevage des tuyaux peut être automatisé, un palpeur déclenchant la remontée des tuyaux lorsqu'ils entrent en contact avec le sommet de la végétation. On distingue aussi des tuyaux en aluminium laqué munis d'ailettes qui augmentent la surface d'échange pour compenser leur faible diamètre. [1]

Le chauffage dit basse température est un cas particulier de thermosiphon. Il utilise de l'eau à des températures inférieures à 50°C, couramment entre 40 et 50°C. Avec ce système, le chauffage est localisé, les tubes fixes ou mobiles, et les moquettes chauffantes (encore appelées paillage radiant), étant placés le plus près possible des cultures. Il est utilisé comme chauffage de base, associé à un chauffage de sol ou de substrat, ou comme chauffage d'appoint.

Les avantages du chauffage localisé à basse température sont :

- la faiblesse des investissements ;
- la facilité de mise en œuvre et la souplesse ;
- l'efficacité thermique, qui est à l'origine d'économies d'énergie pouvant aller jusqu'à 30% par rapport aux systèmes conventionnels.

Ses inconvénients sont un temps de réponse long, et surtout une puissance de chauffage limitée par les faibles températures d'eau utilisables et le nombre de tuyaux qui ne doivent pas occasionner trop de gênes. De ce fait, il est recommandé d'associer ce type de chauffage à des écrans thermiques et à un chauffage d'appoint. [1]

5.2. Chauffage racinaire

Cette technique vise à maintenir l'environnement racinaire à une température de consigne. Lorsqu'elle influe sur la température de l'air, celle-ci est généralement limitée et ne permet pas de faire l'économie du chauffage aérien.

Le chauffage des racines peut être obtenu grâce à des tubes enterrés dans le sol, noyé dans un plancher en béton, ou encore placés en contact avec un substrat de culture. Le transfert de chaleur vers les racines se fait par conduction, à travers le sol, le béton ou le substrat de culture [1].

5.3. Chauffage du sol

Le chauffage du sol par tuyaux enterrés requiert un sol meuble et humide, favorable à la conduction de la chaleur. Une couche isolante peut être mise en place en profondeur pour réduire les déperditions vers le sous-sol. La température de l'eau dans les tuyaux doit être

régulée, elle ne doit pas dépasser 45 à 50°C sous peine de dessécher le sol et les racines, et de favoriser la formation de manchons secs, très isolants, autour des tuyaux de chauffage [1].

•Avantages :

-L'émission de chaleur par le sol contribue au chauffage de l'ambiance et à la stabilisation de sa température ;

-L'inertie thermique du sol permet de tamponner les variations de la température de l'air en cas de panne de chauffage ou de chute brutale de températures extérieurs ;

-Enfin, le chauffage du sol a l'avantage de n'être à l'origine d'aucun encombrement dans la serre ;

•Inconvénients/contraintes :

-L'écartement des tuyaux ne doit pas être trop grand, pour éviter une répartition hétérogène de la chaleur dans le sol ;

-Le chauffage doit être mis en route 2 à 3 jours avant la mise en place des plantes, pour tenir compte de l'inertie thermique du sol ;

-Il faut pouvoir chauffer suffisamment l'air pour éviter les déséquilibres de température entre la partie aérienne et les racines, néfastes au fonctionnement des plantes ;

-L'irrigation doit être augmentée pour tenir compte de l'effet desséchant du chauffage du sol ;

5.4. Production d'air chaud

De l'air chaud peut être produit, soit par des aérothermes (figure I.4), soit par des générateurs d'air chaud (figure I.5), ou par des pompes à chaleur eau/air ou air/air.



Figure (I.4) : Aérotherme



Figure (I.5) : Générateur d'air chaud

5.4.1. Aérothermes

Les aérothermes permettent de transmettre la chaleur vers l'air. Les aérothermes à eau sont de loin les plus communs dans les serres. Ils consistent en des tubes métalliques, traversés par de l'eau chaude, échangeant de la chaleur par convection avec l'air. La surface d'échange est augmentée par la présence d'ailettes et le coefficient de convection par l'action d'un ventilateur (fig I.6). Les aérothermes à eau sont utilisés derrière une chaudière ou sur des eaux de rejets ou de forage. Les aérothermes électriques ne sont utilisés que dans les serres de régions bénéficiant d'électricité très bon marché, comme le Québec [1].

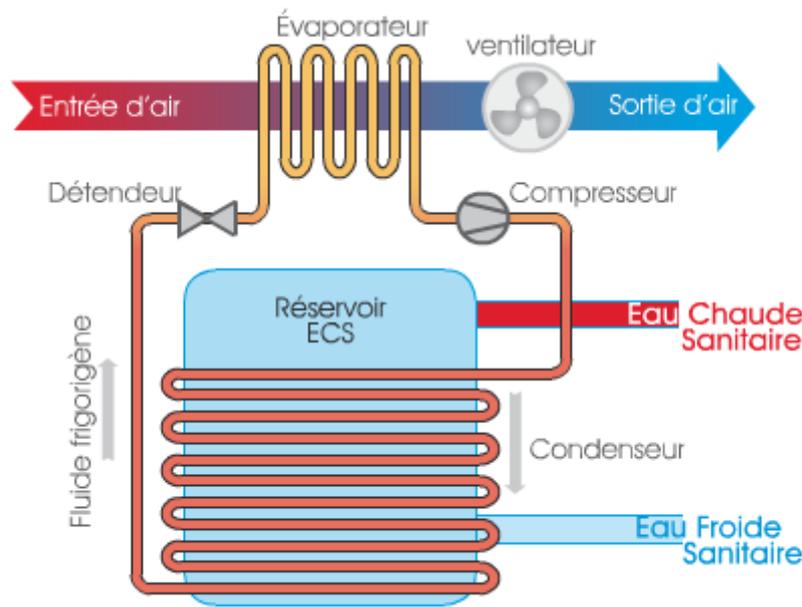


Figure (I.6) : représentation d'un aérotherme à eau.

5.4.2. Générateurs d'air chaud

Les générateurs d'air chaud brûlent un combustible, généralement un gaz, et réchauffent ainsi l'air qui est envoyé dans la serre (figure I.7).

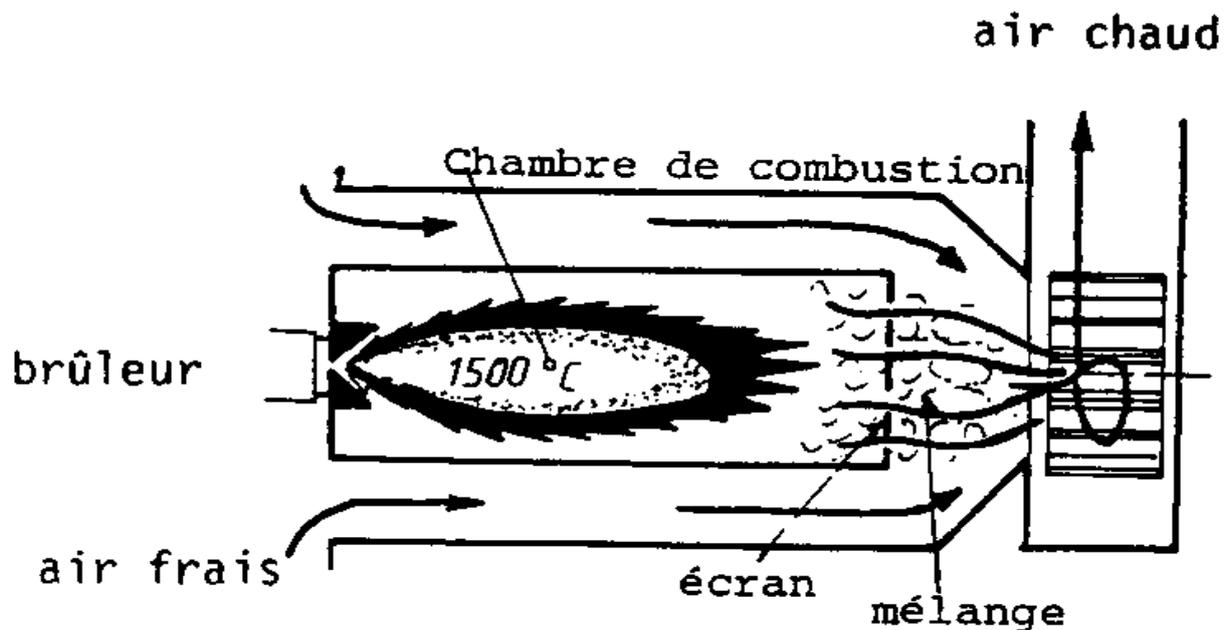


Figure (I.7) : générateur d'air chaud à combustion directe.

Les générateurs à échangeurs sont les plus communs. Les produits issus de la combustion circulent dans un échangeur avant d'être évacués hors de la serre par une cheminée. Un ventilateur favorise le réchauffage de l'air par convection au contact avec l'échangeur et sa distribution dans la serre.

Des gaines en plastique perforé peuvent être utilisées pour améliorer la répartition de la chaleur dans la serre. Ces gaines consistent en des manches en plastique souple et transparent, perforés à intervalles réguliers ou non, fixés sur la sortie des générateurs d'air chaud.

Le rendement de ces appareils tourne autour de 80% du PCI. Il dépend de la qualité du réglage et du combustible utilisé. Lorsque la chaleur latente des fumées est récupérée, le rendement peut atteindre une valeur très proche de 100% du PCI [1].

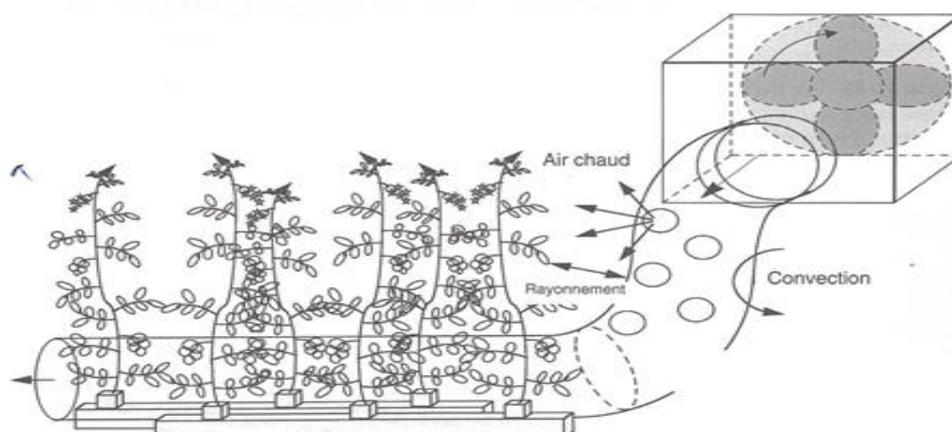


Figure (I.8) : Gaine de distribution perforée, associée à un générateur d'air chaud pulsé.

Ces appareils présentent les avantages suivants :

- faible investissement ;
- entretien réduit ;
- temps de réponse très court ;

Mais ils ont les inconvénients suivants :

- faible inertie : les températures dans la serre oscillent donc fortement autour de la consigne ;
- mauvaise répartition des plantes elles-mêmes, entraînant une consommation d'énergie supérieure à celle des systèmes rayonnants, à température de surface des végétaux égale.

5.5. Refroidissement et humidification des serres

L'effet de serre est responsable d'un réchauffement excessif de l'air à l'intérieur des serres en été. Les températures élevées ont un effet négatif sur la production. Il est donc essentiel de pouvoir agir contre l'effet de serre ou de ses conséquences.

La première technique consiste à envoyer dans la serre de l'air préalablement refroidi par passage à travers un matelas poreux maintenu constamment humide (*cooling system*), et la seconde consiste à éliminer une partie de l'énergie en excès en l'utilisant pour faire évaporer de l'eau injecté à l'intérieur de la serre (nébulisation fine et aspiration) [1].

Il faut aussi ventiler les serres, car la ventilation favorise le remplacement de l'air chaud intérieur par de l'air moins chaud en provenance de l'extérieur. La ventilation est le moyen le plus simple pour refroidir une serre.

5.5.1. Ventilation

•Ventilation statique

L'air intérieur est en principe plus chaud que l'air extérieur. La serre est donc en légère surpression par rapport à l'air extérieur, ce qui favorise le renouvellement d'air. La ventilation statique consiste à favoriser le renouvellement d'air en ménageant des ouvertures en faitage ou sur les côtés. Il existe de nombreuses manières pour favoriser la ventilation statique, plus ou moins sophistiqués selon le type d'abri. La plupart des serres sont équipées d'ouvrants en faitage [1].



Figure (I.9) : aération d'une serre tunnel en plastique en enroulant la couverture sur le côté.

L'efficacité de la ventilation statique dépend des facteurs suivants :

- hauteur des serres : plus les serres sont hautes, mieux elles sont ventilées « effet cheminée » ;
- présence d'ouvertures latérales : les ouvrants latéraux favorisent la circulation de l'air dans la serre ;
- l'orientation de l'ouverture par rapport au vent : les serres peuvent être bien ventilées si elles s'ouvraient face au vent.

•*Ventilation dynamique*

La ventilation dynamique repose sur l'action de ventilateurs entraînés par des moteurs électriques et installés le long de l'une des façades de la serre. Les ventilateurs fonctionnent en général en extraction, c'est-à-dire en aspiration. Le taux de renouvellement d'air atteint en ventilation dynamique est de l'ordre de 60 volume par heure.

La technique de ventilation dynamique est très efficace. Son principal inconvénient est d'être à l'origine d'un mouvement d'air qui peut être excessif à proximité des plantes. Il y a de surcroît un gradient de vitesse de déplacement de l'air, décroissant à partir de la zone située juste derrière les ventilateurs. Pour remédier à cet inconvénient, il est possible de recourir à des déflecteurs, placés à intervalles réguliers, ou à des gaines de distribution en plastique perforé. Ces équipements sont à l'origine d'ombres portées et d'une réduction de la qualité de lumière utile à la photosynthèse parvenant aux plantes [1].



Figure (I.10) : aération dynamique des serres.

5.5.2. Cooling system

Dans une serre équipée d'un *cooling system*, l'une des façades est équipée de ventilateurs, fonctionnant en extraction d'air, et l'autre d'un dispositif constitué d'un matelas poreux fait de paille, de fibre de coco ou d'un maillage en matière synthétique, appelé *pad* (paillason) figure (I.10). Les *pads* sont maintenus constamment humides à l'aide d'asperseurs. L'air extérieur est forcé de passer à travers les *pads*, pour faire évaporer l'eau au niveau des *pads*. L'air qui traverse un *pad* se charge en humidité, et pénètre dans la serre avec une température plus basse que celle de l'air extérieur [1].

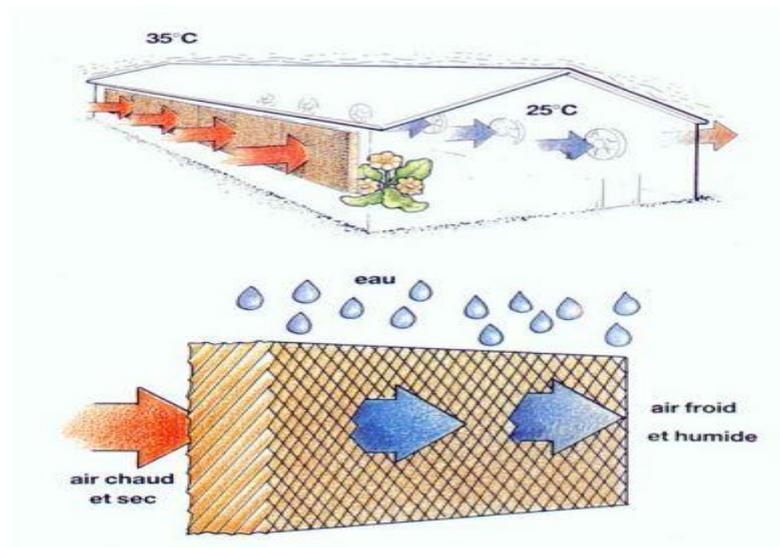


Figure (I.11) : cooling system.

Cette technique permet de faire baisser la température de l'air de 3 à 6°C. Elle est d'autant plus efficace que l'air extérieur est sec. C'est la raison pour laquelle elle s'applique avec succès aux conditions désertiques. En revanche, cette technique n'est pas recommandable si l'air extérieur est humide, ce qui est généralement le cas des régions littorales.

La longueur des serres doit être prise en considération au moment de décider dans l'investissement d'un *cooling system*. Au-delà de 40 m, le gradient de température et d'humidité augmente, depuis la zone située juste derrière les *pads* jusqu'à celle située juste avant les extracteurs. Ce qui entraîne une hétérogénéité du climat de la serre.

5.5.3. Nébulisation fine

La nébulisation fine repose sur le principe suivant : les gouttelettes fines sont produites à bonne hauteur au-dessus du couvert végétal. Leur temps de chute est suffisamment long, pour permettre leur vaporisation par absorption d'énergie, avant qu'elles n'atteignent le sommet de la culture. La vaporisation de l'eau permet alors d'abaisser la température de l'air de la serre [1].

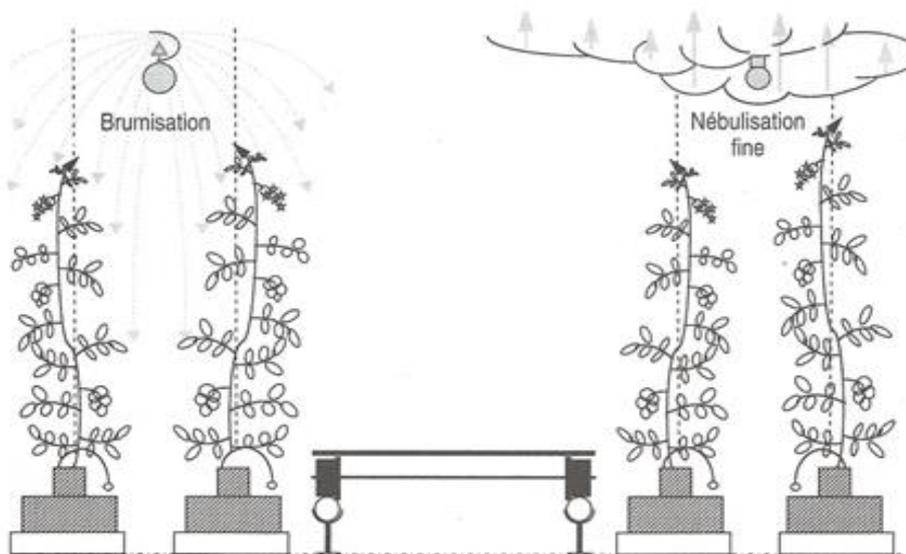


Figure (I.12) : Brumisation et nébulisation fine.

La diminution de la température obtenue avec une installation de nébulisation fine peut aller jusqu'à 6°C.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a recensé d'abord les différents types de serres existant. On s'est ensuite imprégné de la physique des serres avant de comprendre la problématique de la gestion du climat interne d'une serre.

*Chapitre II : Bilans thermiques
et massiques*

1. Introduction

Les conditions climatiques au voisinage du sol sont les résultats des échanges de chaleur et de masse entre le sol, la végétation, les parois de la serre et l'atmosphère. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes, à savoir :

- par rayonnement : les échanges correspondent à un transfert d'énergie par des oscillations rapides de champ électromagnétique qui ne nécessite pas de milieu matériel pour se déplacer.
- par conduction : les échanges ont lieu aux seins des milieu sans mouvement, ce qui correspond à la propagation de proche en proche des énergies moléculaires internes.
- par convection : les échanges s'effectuent grâce au transport de l'énergie thermique par un fluide en mouvement.

2. Echanges de chaleur par rayonnement

Les mécanismes d'interaction de la lumière avec les plantes sont relativement complexes. La totalité du flux d'énergie solaire couvre le domaine de longueur d'onde comprise entre (0.15 et 4 μm) alors que celle de la surface terrestre est comprise dans le domaine allant de (3 à 100 μm).

Il n'existe qu'un très faible recouvrement entre les deux spectres, ces deux domaines appelés les domaines des courtes et des grandes longueurs d'ondes. Le bilan radiatif est la somme algébrique des échanges radiatifs de courtes et de grandes longueurs d'ondes [2,3].

a) Rayonnement de courte longueur d'onde

Les parois de la serre semi transparentes transmettent la plus grande partie du rayonnement solaire utile à la photosynthèse (entre 0.4 et 0.7 μm). [2,3].

Le rayonnement incident (direct et diffus) peut varier considérablement d'un point à un autre à cause des positions du soleil et des zones d'ombre [4,5].

D'une manière générale, il a été montré que la proportion du rayonnement diffus est plus importante sous serre qu'à l'extérieur et l'effet de la saison est très important sur la transmission du rayonnement sous serre.

C'est la raison pour laquelle, il est nécessaire de déterminer des valeurs moyennes, correspondant à une certaine intégration spatiale, pour décrire le profil lumineux à l'intérieur d'un couvert végétal [6].

b) Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes

Les échanges de chaleur dans une serre se produisent essentiellement entre le sol, les plantes, les parois et l'extérieur. La nature des parois joue donc un rôle prédominant. Les matériaux utilisés pour les parois doivent être le plus transparent possible dans le domaine du visible, afin de favoriser la photosynthèse et être opaque dans le domaine des infrarouges thermique pour optimiser l'effet de serre radiatif.

3. Echanges de chaleur par conduction

Dans les conditions naturelles, les échanges de chaleur par conduction concernent essentiellement les transferts thermiques dans le sol et à travers les parois, compte tenu de la faible épaisseur des parois, on considère que les échanges sont stationnaires et on les intègre dans un coefficient global de transfert [7,8]. Le sol n'est généralement pas homogène verticalement. Il peut être constitué par différentes couches qui ont des propriétés thermiques différentes (composition, humidité, texture...) de plus les propriétés thermiques du sol peuvent varier en fonction du temps. C'est pourquoi on utilise des modèles numériques complexes, dans lesquels le sol peut être représenté comme l'empilement de couches homogènes ou les équations de base régissant les phénomènes de conduction peuvent être appliquées [9,10].

La théorie de la conduction repose sur la relation de Fourier [11] : la densité de flux est proportionnelle au gradient de la température :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T). \text{ (W/m}^2\text{)}. \quad (\text{II.1})$$

Ou sous forme algébrique (unidimensionnel) :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial X} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Φ : flux de chaleur transmis par conduction. (W).

λ : conductivité thermique de milieu. (W m⁻¹°C⁻¹).

X : variable d'espace dans la direction du flux. (m).

S : aire de la section de passage du flux de chaleur. (m²).

4. Echanges de chaleur par convection

Les transferts de chaleur entre les surfaces et l'atmosphère en mouvement sont de types convectifs.

Selon la circulation des fluides, on distingue trois formes de convection :

4.1. Convection naturelle (libre)

La convection est dite naturelle quand le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée des différences de température qui existent dans le milieu. La circulation résulte de la simple hétérogénéité des températures du fluide, notamment au voisinage des surfaces chaudes et froides : le fluide échauffé ayant une masse volumique plus faible que le fluide, il subit une poussée d'Archimède relativement plus forte qui le soulève.

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur par convection aux variables dont il dépend peut-être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels : $Nu=f(Gr, Pr)$ définis par :

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt.}$$

$$Gr = \frac{g\beta \Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad \text{Nombre de Grashof.}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} \quad \text{Nombre de Prandtl.}$$

Où :

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection. (W m⁻² °C⁻¹).

λ : Coefficient de conductibilité thermique de l'air. (W m⁻¹ °C⁻¹).

C_p : Chaleur massique (J / kg °C).

ρ : Masse volumique. (kg /m³).

μ : Viscosité dynamique. (m² / s).

u : Vitesse du fluide. (m / s).

L : longueur caractéristique. (m).

ΔT : écart de température paroi-fluide. (°C).

β : Coefficient de dilatation du fluide. (°C⁻¹).

g : accélération de la pesanteur. (m/ s²).

4.2. Convection forcée

La convection est dite forcée lorsque le mouvement du fluide est provoqué par un champ de force extérieur (pompe, ventilateur...). Dans les conditions naturelles, la convection forcée est due au vent qui est lui-même la résultante du gradient local de la pression atmosphérique. Le fluide échange de la chaleur avec les parois, mais son mouvement est pratiquement peu influencé par les différences de température [12].

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection forcée aux variables dont il dépend peut-être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels : $Nu = f(Re, Pr)$ définis par :

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds.}$$

Avec :

Nu : Nombre de Nusselt

et

Pr : Nombre de Prandtl.

4.3. Convection mixte

Ce cas se rencontre souvent dans les conditions naturelles, lorsque la vitesse de l'air est faible. Les mouvements de l'air sont alors produits à la fois par les facteurs qui entretiennent le vent et par les gradients verticaux de température. Les transferts de chaleur et de masse sont alors dus en partie à la convection naturelle et en partie à la convection forcée.

De nombreux auteurs ont calculé des coefficients d'échange entre l'air et les surfaces environnantes, pour une vitesse moyenne ou bien pour un gradient de température moyen entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Ces coefficients d'échange sont basés sur des corrélations déduites de l'analyse dimensionnelle [13].

Quel que soit le type de convection (libre ou forcée) et quel que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur est donné par la loi de *Newton* : [11].

$$\Phi = h.S.\Delta T \text{ (W)}. \quad \text{(II.3)}$$

Où :

Φ : flux de chaleur par convection. (W).

h :coefficient de transfert de chaleur par convection. (W m⁻² °C⁻¹).

S : air de la surface.(m²).

ΔT : différence de température.(°C).

5. Quantification des échanges convectifs dans une serre

L'échange convectif est l'un des mécanismes les plus importants de transfert de chaleur dans les serres. L'échange par convection se produit entre la toiture, le sol et la végétation, ou entre les parois et l'air extérieur.

Le processus de transfert de chaleur est gouverné par une combinaison de la convection forcée due à la pression de vent et la convection libre, due aux forces de flottabilité provoquées par des différences de la température entre les parois et l'air. Ces deux modes de convection dépendent du type de la serre et du climat extérieur et de la condition de ventilation. En serre bien aérée, la convection forcée est dominante, en raison du mouvement d'air assez fort. En serre strictement fermée, due des vitesses intérieures très basses d'air, la convection libre est le processus le plus dominant à cause des faibles vitesses de circulation d'air. La densité du flux de chaleur de convection est proportionnelle à la différence de la température entre les surfaces et l'air. [14].

L'expression du nombre de *Nusselt* pour des écoulements laminaires et turbulents en modes de convection libre et forcée le long d'une plaque plane horizontale est présenté dans le tableau (II.1) d'après [15], [16] :

Tableau (II.1) : Nombre de *Nusselt* le long d'une plaque plane horizontale.

L'écoulement	Convection libre	Convection force
Laminaire	$Nu = 0,54(Gr Pr)^{1/4}$.	$Nu = 0,67. Re^{1/2} Pr^{1/3}$.
Turbulent	$Nu = 0,14(Gr Pr)^{1/3}$	$Nu = 0,306. Re^{4/5} Pr^{1/3}$.

Afin de déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection, un critère doit être défini pour identifier le mode de la convection (forcée ou libre) et le type d'écoulement (laminaire ou turbulent). Le nombre de *Richardson* (Ri) donne un critère pour distinguer directement la convection forcée de la convection naturelle ou mixte.

Quand (Re^2) est beaucoup plus grand que (Gr) , les forces de flottabilité sont négligeables et la convection forcée est dominante tandis que l'état inverse a comme conséquence de favoriser la convection libre.

La distinction entre les écoulements laminaires et turbulents est basée sur le nombre de (Gr) pour la convection libre et (Re) pour la convection forcée. Le critère correspondant à l'air à 20 °C est également fourni dans le tableau (II.2) d'après [17]:

Tableau (III.2) : Modes de convection et types d'écoulement (cas d'une plaque plane horizontale).

Mode de convection	Écoulement laminaire	Écoulement turbulent
Convection naturelle $(Ri = \frac{Gr}{Re^2} \geq 16)$ Pour l'air à 20°C : $\frac{L\Delta T}{\mu^2} > 484$	$Gr \leq 10^8$. $Nu = 0,54(Gr Pr)^{1/4}$. $L^3 \Delta T < 0,63$	$(Gr > 10^8)$. $Nu = 0,14(Gr Pr)^{1/3}$. $L^3 \Delta T > 0,63$
Convection mixte $0.1 < \frac{Gr}{Re^2} < 16$		
Convection forcée $Ri = \frac{Gr}{Re^2} \leq 0.1$ Pour l'air à 20°C : $\frac{L\Delta T}{\mu^2} < 3$	$(Re \leq 5 \cdot 10^4)$. $Nu = 0,67 \cdot Re^{1/2} Pr^{1/3}$. $u \cdot L < 0,75$	$(Re > 5 \cdot 10^4)$. $Nu = 0,306 \cdot Re^{4/5} Pr^{1/3}$. $u \cdot L > 0,75$

5.1. Echange convectif entre la surface du sol et l'air intérieur

La puissance convective entre le sol intérieur et l'air intérieur de la serre est donnée par [22] :

$$Q_{c(s,a)int} = h_{c(s,a)int} S_{sint} (T_{sint} - T_{aint}). \quad (W). \quad (II.4)$$

$h_{c(s,a)int}$: coefficient d'échange convectif entre le sol intérieur et l'air intérieur (W/m²°C).

S_{sint} : surface du sol intérieur (m²).

T_{aint} : température de l'air intérieur (°C).

T_{sint} : température du sol intérieur (°C).

On note que : $h_{c(s,a)int} = h_{c(c,a)int}$ d'après la référence [22].

Entre le sol et l'air intérieur nous utilisons les expressions données par [13], [25] :

$$h_{c(s,a)int} = 1,52(T_{sint} - T_{aint})^{0,33} + 5,2 (U_m/L_s)^{0,5}. \quad (W/m^2°C) \quad (II.5)$$

Avec :

L_s : longueur de la serre (m)

U_m : la vitesse moyenne du déplacement de l'air intérieur donnée par :

$$U_m = (V_s/S_t) \left(\frac{R}{3600} \right) \quad \text{ou} \quad U_m = (L_s \frac{R}{3600}) \quad (II.6)$$

Où :

R : taux de renouvellement horaire de l'air intérieur de la serre (h^{-1}).

S_t : surface transversale (m^2)

V_s : volume de la serre (m^3)

L_s : longueur de la serre (m).

5.2. Echange convectif entre la couverture et l'air extérieur

La puissance convective entre la couverture et l'air extérieur est donnée par [22] :

$$Q_{c(c,aext)} = h_{c(c,aext)} S_c (T_c - T_{aext}). \quad (W). \quad (II.7)$$

Où :

$h_{c(c,aext)}$: coefficient d'échange convectif entre la paroi et l'air extérieur ($W/m^2\text{°C}$).

S_c : surface de la couverture (m^2).

T_c : température de la couverture (°C).

T_{aext} : température de l'air extérieur (°C).

Il existe plusieurs corrélations déterminant le coefficient d'échange convectif :

Pour le calcul du coefficient d'échange extérieur on peut retenir l'expression de Mc Adams [19], [21] :

$$h_{c(a,c)ext} = 5,7 + 3,8 V. \quad (W/m^2\text{°C}) \quad (II.8)$$

$$V \leq 7,72 \text{ (m/s)} \approx 30 \text{ (km/h)}.$$

Pour déterminer $h_{c(c,a)ext}$ entre la paroi et l'air extérieur on peut retenir l'expression proposée par: [25], [27].

$$h_{c(a,c)ext} = 0,95 + 6,76 V^{0,49}. \quad (W/m^2\text{°C}) \quad (II.9)$$

L'équation est valide pour :

$$(T_{aext} < T_{cext}) \text{ et } V \leq 6,3 \text{ (m/s)}.$$

5.3. Echange convectif entre la végétation et l'air intérieur

La puissance convective entre la végétation et l'air intérieur donnée par [22]:

$$Q_{c(v,aint)} = h_{c(v,aint)} S_v (T_v - T_{aint}). \quad (W). \quad (II.10)$$

Avec :

$h_{c(v,aint)}$: coefficient d'échange convectif entre la végétation et l'air intérieur ($W/m^2\text{°C}$).

T_c : température de la couverture (°C).

T_{aint} : température de l'air intérieur (°C).

S_v : surface de la végétation (m^2).

En assimilant une feuille de plante à une plaque plane placée dans un écoulement d'air à incidence nulle, les lois régissant le transfert convectif s'écrivent :

• Régime turbulent : $Re > 3.10^5$

$$Nu = \frac{0.036 Re^{0.6} Pr}{1+0.83(Pr^{0.6}-1)} \quad [28]$$

• Régime laminaire : $Re < 3.10^5$

$$Nu = 0,67 Re^{1/2} Pr^{1/3}. \quad [28]$$

Et par [29] :

$$Nu = 0,37 (Gr + 6,92 Re^2)^{0,25}. \quad [29]$$

$$h^{c(v,a) \text{ int}} = Nu \frac{\lambda_{\text{air}}}{D_v}$$

D_v : dimensions moyenne d'une feuille de végétation.

6. Bilans radiatifs

La serre comme la plupart des systèmes solaires thermiques est le siège de tous les modes de transfert de chaleur (échange radiatifs, convectifs, par renouvellement d'air et par changement de phase...) qui s'effectuent d'une part entre les différents nœuds dans la serre et d'autre part entre les sous-systèmes et le milieu extérieur (voûte céleste, air extérieur, sol extérieur environnant).

Le climat dans une serre est fonction des conditions climatiques telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Les phénomènes physiques qui interviennent dans le climat interne de la serre sont essentiellement des transferts thermiques et hydriques.

6.1. Rayonnement de courte longueur d'onde (CLO)

L'originalité de la serre réside dans sa propriété de transmettre une grande partie du rayonnement solaire et, plus précisément, celui compris entre 400 et 700 nm et qui contribue au processus de la photosynthèse [18].

L'absorption du rayonnement à travers un matériau est proportionnelle à son intensité, à la distance de son trajet optique et au coefficient d'extinction [19]:

$$dI = - K I dx \quad [19] \tag{II.11}$$

K : coefficient d'extinction constant pour l'ensemble du spectre solaire.

L'intégration de cette équation sur une épaisseur (d) du matériau donne :

$$\tau = I / I_0 = \exp (- K x) \tag{II.12}$$

I_0 : flux solaire incident.

I : flux solaire transmis à travers une épaisseur (d) du matériau.

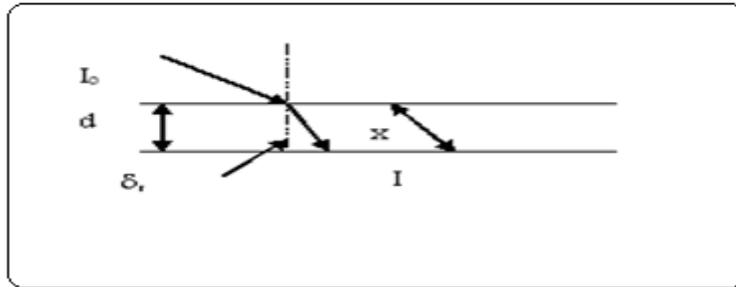


Figure (II.1) : Atténuation du rayonnement solaire.

Avec :
$$X = \frac{d}{\cos \delta r}$$

δr : est l'angle de diffraction ($^{\circ}$).

d : est l'épaisseur du matériau (m).

τ : est le coefficient d'atténuation.

A titre d'exemple le coefficient d'extinction du verre est [20] :

$$K_e = 1.524 \text{ cm}^{-1}$$

6.2. Rayonnement solaire

Pour traiter le problème du rayonnement solaire au niveau de la serre, il nous faut calculer les quantités suivantes [21,22] :

Qc: puissance absorbée par les parois (toit, paroi Nord, paroi Sud, paroi Est, paroi Ouest).

Qp: puissance absorbée par les plantes.

Qs : puissance absorbée par le sol.

La donnée de base du calcul est R_g .

R_g : le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale.

6.2.1. Composante directe :

Le rayonnement global R_g se sépare en deux composantes [23] :

1-La composante directe qui provient directement du soleil **I** :

$$I = I^* \sin (h). \tag{II.13}$$

$$I^* = I_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)]. \tag{II.14}$$

$$I_0 = 1353 \text{ (W/ m}^2\text{)} \tag{II.15}$$

Avec j : le numéro du jour de l'année.

2- La composante diffuse **D**, qui provient indirectement du soleil après plusieurs diffusions : air, nuage, ...

Il existe deux cas où le rayonnement global est totalement diffus ($I=0$) :

- lorsque le ciel est couvert (conventionnellement nébulosité $N=8$).

- juste avant le lever et après le coucher du soleil.

Il existe toujours une proportion de flux diffus dans le rayonnement global, même pour un ciel clair et quand le soleil est haut.

Nous considérons que pour un ciel sans nuage la proportion (A) du flux diffus dans le rayonnement global varie avec la hauteur du soleil (h) de la façon suivante :

Tableau (II.3) : part du rayonnement diffus selon la hauteur du soleil h [21].

h (hauteur du soleil en degré)	0 à 2	5	10	20	30	60
A (proportion du flux diffus)	1	0.8	0.5	0.3	0.25	0.2

Pour tenir compte de la nébulosité, et sachant que :

$$D = 1. R_g \text{ si } (N=8). \tag{II.16}$$

$$D = A. R_g \text{ si } (N=0). \tag{II.17}$$

On emploiera la formule linéaire suivante :

$$D = R_g. [A + (1-A)\frac{N}{8}]. \tag{II.18}$$

$$I = R_g. [(1-A) (1-\frac{N}{8})]. \tag{II.19}$$

D et **I** sont le rayonnement diffus et direct incident sur une surface horizontale.

6.2.2. Composante diffuse

a) Au niveau de la couverture (toit)

La puissance absorbée par la couverture (toit) de la serre est proportionnelle à la surface de sa projection sur un plan horizontal [21] :

$$Q_c = \alpha S_c D \text{ (W)}. \tag{II.20}$$

Avec :

S_c : surface de la projection horizontale de la paroi (m^2).

α : coefficient d'absorption de la paroi au rayonnement solaire.

D : rayonnement diffus (W/m^2).

b) Au niveau des végétations (plantes)

Au niveau des végétations (plantes) la puissance absorbée est [21] :

$$Q_v = L_{\text{serre}} n_{\text{rangs}} (H_v + D_v) (1 - a_v) D \quad (\text{W}). \quad (\text{II.21})$$

Avec :

L_{serre} : longueur de la serre (m).

n_{rang} : nombre de rang des végétations.

H_v : hauteur des végétations (m).

D_v : diamètre des végétations (=largeur d'un rang) (m).

a_v : albédo des végétations.

D : rayonnement diffus (W/m^2).

c) Au niveau du sol

Au niveau du sol la puissance absorbée est [21] :

$$Q_s = (1 - a_s) S_s D. \quad (\text{W}). \quad (\text{II.22})$$

a_s : albédo du sol.

S_s : surface du sol (m^2).

Albédo du sol donné par la référence [23] :

- sol humide : 0,05 à 0,30.

- sol sec : 0,15 à 0,40.

6.3. Rayonnement de grande longueur d'onde (GLO)

6.3.1. Echange radiatif entre la voute céleste et le toit de la serre

La puissance radiative entre la voute céleste et la couverture de la serre est donnée par [22]:

$$Q_{r(c,cl)} = \varepsilon_c \varepsilon_{cl} \sigma S_c F_{c,cl} (T_c^4 - T_{cl}^4). \quad (\text{W}). \quad (\text{II.23})$$

Où :

ε_{cl} : l'émissivité du ciel.

ε_c : l'émissivité de la couverture.

S_c : la surface de la couverture (m^2).

T_c : température de la couverture ($^{\circ}\text{C}$).

T_{cl} : température du ciel ($^{\circ}\text{C}$).

$F_{c,cl}$: facteur de forme entre la couverture et le ciel.

Or: $Q_{r(c,cl)} = -Q_{r(cl,c)}$.

$$S_c F_{cs} = S_s F_{sc}$$

Il y a plusieurs formules qui donnent la température de ciel, notamment celle de [25] :

$$T_{cl} = P_{cl}(T_{aext}-6) + (1-P_{cl}) (0,0552T_{aext}^{1,5}). \quad (II.24)$$

$$\varepsilon_c = 1 - 0,261 \cdot \exp [-7,77 \cdot 10^{-4} (T_{aext}-273)^2]. \quad (II.25)$$

$$\varepsilon_c = 0,787 + 0,64 \ln (T_{aext}/273). \quad (II.26)$$

P_{cl} est la fraction de nuages a couvert la surface de la serre.

Et celle de Swinbank [19], [21], Pour $P_{cl} = 0$

$$T_{cl} = 0,0552T_{aext}^{1,5}. \quad (II.27)$$

T_{aext} : température de l'air extérieur (°C).

6.3.2. Echange radiatif entre la végétation et la couverture (toit)

La puissance radiative entre la végétation et la couverture de la serre est donnée par [22] :

$$Q_{r(v,c)} = \varepsilon_v \varepsilon_c \sigma S_v F_{v,c} (T_v^4 - T_c^4) \text{ (W)}. \quad (II.28)$$

Avec :

$F_{v,c}$: facteur de forme entre la végétation et la couverture.

S_v : surface de la végétation (m²).

$\varepsilon_c, \varepsilon_v$: émissivité de la végétation et la couverture.

6.3.3. Echange radiatif entre la végétation et la paroi Sud

La puissance radiative entre la végétation et la paroi *Sud* est donnée par [22] :

$$Q_{r(v,ps)} = \varepsilon_v \varepsilon_{ps} \sigma S_v F_{v,ps} (T_v^4 - T_{ps}^4) \text{ (W)}. \quad (II.29)$$

Avec :

$F_{v,ps}$: facteur de forme entre la végétation et la paroi Sud.

S_v : surface de la végétation (m²).

$\varepsilon_{ps}, \varepsilon_v$: émissivité de la végétation et la paroi sud.

6.3.4. Echange radiatif entre la végétation et la paroi Nord

La puissance radiative entre la végétation et la paroi *Nord* est donnée par [22] :

$$Q_{r(v,pn)} = \varepsilon_v \varepsilon_{pn} \sigma S_v F_{v,pn} (T_v^4 - T_{pn}^4) \text{ (W)}. \quad (II.30)$$

Avec :

$F_{v,pn}$: facteur de forme entre la végétation et la paroi Nord.

S_v : surface de la végétation (m²).

$\varepsilon_{pn}, \varepsilon_v$: émissivité de la végétation et la paroi nord.

6.3.5. Echange radiatif entre la végétation et la paroi Est

La puissance radiative entre la végétation et la paroi *Est* est donnée par [22] :

$$Q_{r(v,pe)} = \varepsilon_v \varepsilon_{pe} \sigma S_v F_{v,pe} (T_v^4 - T_{pe}^4) \text{ (W)}. \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$F_{v,pe}$: facteur de forme entre la végétation et la paroi est.

S_v : surface de la végétation (m²).

ε_{pe} ; ε_v : émissivité de la végétation et la paroi est.

6.3.6. Echange radiatif entre la végétation et la paroi ouest

La puissance radiative entre la végétation et la paroi *ouest* est donnée par [22] :

$$Q_{r(v,pw)} = \varepsilon_v \varepsilon_{pw} \sigma S_v F_{v,pw} (T_v^4 - T_{pw}^4) \text{ (W)}. \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$F_{v,pw}$: facteur de forme entre la végétation et la paroi ouest.

S_v : surface de la végétation (m²).

ε_{pw} ε_v : émissivité de la végétation et de la paroi ouest.

6.3.7. Echange radiatif entre la surface du sol de la serre et la végétation

La puissance radiative entre le sol intérieur et la végétation est donnée par [22] :

$$Q_{r(sint,v)} = \varepsilon_{sint} \varepsilon_v \sigma S_{sint} F_{sint,v} (T_{sint}^4 - T_v^4). \text{ (W)}. \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$F_{sint,v}$: facteur de forme entre le sol et la végétation.

S_{sint} : surface du sol intérieur (m²).

ε_v ε_{sint} : émissivité de la végétation et le sol intérieur.

6.3.8. Echange radiatif entre la surface du sol de la serre et le toit de la serre

La puissance radiative entre le sol intérieur et la couverture est donnée par [22] :

$$Q_{r(sint,c)} = \varepsilon_{sint} \varepsilon_c \sigma S_{sint} F_{sint,c} (T_{sint}^4 - T_c^4). \text{ (W)}. \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$F_{sint,v}$: facteur de forme entre le sol intérieur et la couverture.

S_{sint} : surface du sol intérieur (m²).

ε_v ε_{sint} : émissivité de la végétation et le sol intérieur.

7. Puissance échangée par évaporation / condensation

Lorsque l’humidité de l’air dépasse l’humidité saturante à la température T_i de la paroi, une condensation se produit et par conséquent un échange par chaleur latente aura lieu entre l’air et la paroi.

Le mécanisme mutuel entre un transfert de masse (vapeur d’eau) et un transfert de chaleur (convection) est liés par leur coefficient de transferts h_c , h_l , et cela de part et d’autre de la paroi :

a) Du côté intérieur (au niveau des parois avec l’air intérieur)

Formule de Lewis [21].

$$Q_{l(aint,p)} = S_{pint} h_{l(p,aint)} (W_{aint} - W_{(Tpint)}). \tag{II.35}$$

Où :

$h_{l(p,aint)}$: coefficient d’échange par chaleur latente (W/m^2).

S_{pint} : surface intérieure des parois (m^2).

$W_{(Tpint)}$: humidité spécifique de saturation à la température des parois ($kg_{air\ sec}/kg_{esu}$).

W_{aint} : humidité spécifique de l’air intérieur ($kg_{air\ sec}/kg_{esu}$).

$$h_{l(p,aint)} = \frac{Lv}{r_{aint}}$$

$$r_{aint} = \frac{C_p T_{aint}}{h_{p,aint}^c}$$

r_a : résistance aérodynamique.

$$C_p(T) = \frac{3556.37}{T+273.15}$$

$L_v(T_{air})$ chaleur latente de vaporisation à la température de l’air intérieur.

$$L_v(T) = 24946,36 - 2247 T \text{ (J/kg)}. \tag{II.36}$$

Et

$$L_v(T) = 752,5 - 0,5684 (T+273). \tag{II.37}$$

Il vient donc que :

$$h_{l(p,aint)} = \frac{Lv h_{p,aint}^c(T_{aint})}{C_{p(aint)}}$$

b) Du côté extérieur (au niveau des parois avec l’air extérieur)

La puissance due à la condensation du côté extérieur est donnée par [21] :

$$Q_{l(p,aext)} = S_{pext} \cdot h_{l(p,aext)} (W_{aext} - W_{aint}). \tag{II.38}$$

$h_{l(p,aext)}$: coefficient d'échange de chaleur latente du côté extérieur (W/m^2).

7.1. Evaporation au niveau du sol avec l'air intérieur

La puissance due à l'évaporation au niveau du sol est donnée par [21] :

$$Q_{l(s,aint)} = S_{(s,a)int} \cdot h_{l(s,a)int} (W_{aint} - W_{(Tsint)}). \quad (II.39)$$

Avec :

$$h_{l(s,a)int} = \frac{L_v(T_{int}) h_{(s,a)int}^c (T_{aint})}{C_{paint}} \quad (II.40)$$

W_{aint} et $W_{(Tsint)}$ sont respectivement l'humidité spécifique de l'air à l'intérieur de la serre et de l'air à la température T_s du sol intérieur.

7.2. Evaporation et évapotranspiration

L'évaporation et l'évapotranspiration sont essentiellement conditionnées par :

- l'énergie captée par le végétal ;
- le pouvoir évaporant de l'air.

L'évapotranspiration (**ET**) est la quantité d'eau consommée par une culture dans un temps donné qu'elle soit évaporée à la surface du sol ou transpirée par les organes aériens.

Pour une demande climatique donnée, il existe une infinité de valeurs possibles de (**ET**) selon notamment l'état de la culture et surtout la disponibilité d'eau dans le sol.

En plein air, le processus de l'évapotranspiration potentielle **ETP** généralement utilisé par la formule de Villèle [36] :

$$ETP_s = 0.67 \left(\frac{R_{gs}}{L_v} \right) - 0.2 \quad (\text{mm/j}) \quad (II.41)$$

ETPs : évapotranspiration potentielle sous serre (mm / jour).

R_{gs} : rayonnement global sous serre ($kJ / m^2 \cdot \text{jours}$).

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (2500 kJ / kg).

7.3. Condensation

L'air contient toujours de la vapeur d'eau. La quantité maximale qu'il peut contenir dépend de sa température et croît avec elle. Lorsque la nuit tombe, cet air se refroidit au contact des feuilles, des parois des serres qui se refroidissent plus vite par rayonnement et convection.

Dans les serres, l'évaporation au niveau des cultures associée à la condensation sur les parois correspond donc à un transport de chaleur, c'est-à-dire à une déperdition des serres, qui peut être élevée.

La condensation se forme sur la surface intérieure de la couverture si sa température est au-dessous de la température de points de rosée de l'air.

La quantité de chaleur donnée par la chaleur latente de condensation, Q_{cond} , comme suite [19] :

$$Q_{\text{cond}} = h_{\text{cond}} L_V S_c \rho (W_{\text{ai}} - W_c). \quad (\text{W}). \quad (\text{II.42})$$

Où :

L_V : chaleur latente (J/kg)

ρ : masse volumique (kg / m³).

W_c : humidité absolue de la couverture (kg_{air sec}/kg_{eau}).

W_{ai} : humidité absolue de l'air intérieur (kg_{air sec}/kg_{eau}).

Le transfert de chaleur par condensation et place de l'enregistrement de la convection par le processus de diffusion, les coefficients de transfert de chaleur sont racontés par conséquent comme suit :

$$h_{\text{cond}} = h_{\text{ci}} / \rho C_p. \quad (\text{Rapport de Lewis}). \quad (\text{II.43})$$

Donc la chaleur de condensation dans le serre devient : [19] :

$$Q_{\text{cond}} = h_{\text{ci}} L_V S_c (W_{\text{ai}} - W_c) / C_p. \quad (\text{W}). \quad (\text{II.44})$$

Où :

C_p : chaleur massique (J/ kg °C).

ρ : masse volumique de l'air intérieur (kg / m³).

h_{ci} : le coefficient de transfert de la chaleur par convection (W/m² °C).

8. Bilans énergétiques

Les échanges thermiques dans la serre se font par rayonnement, par convection et par conduction.

L'échange hydrique se fait par évapotranspiration de la culture, par évaporation de la quantité d'eau dans le sol apporté par l'irrigation, ou par renouvellement d'air dû à l'aération de la serre et par évaporation/ condensation au niveau de la paroi.

Le bilan énergétique de chaque composant de la serre (toit, sol intérieur, et les parois de la serre) tient compte de l'ensemble des flux thermiques échangés entre la serre et son environnement. Il s'exprime comme suit :

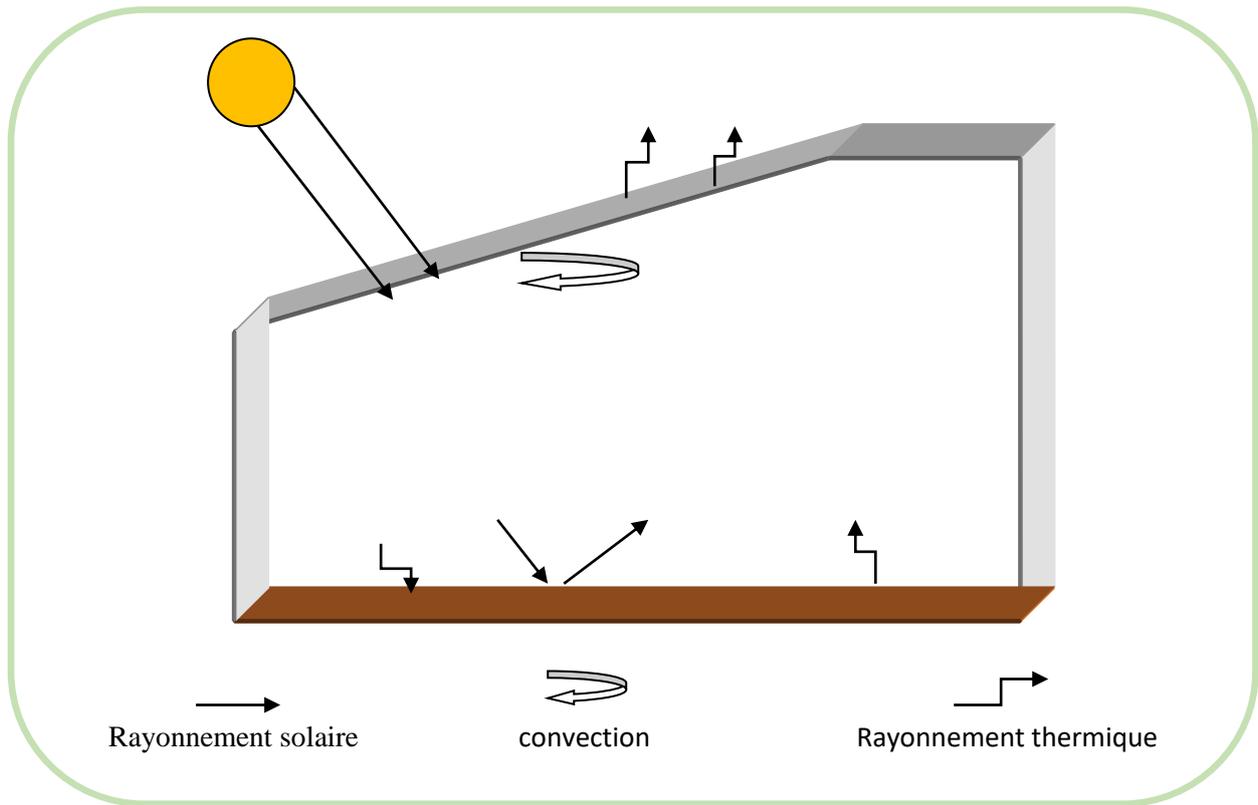


Figure (II.2) : Schéma des flux échangés.

8.1. Bilan d'énergie du toit de la serre

Le toit de la serre échange de la chaleur par convection avec l'air extérieur et intérieur, et par rayonnement de grandes longueurs d'ondes avec les surfaces environnantes et la voûte céleste, alors qu'il reçoit un rayonnement de courtes longueurs d'ondes provenant du soleil.

Le flux de chaleur convectif communiqué à l'air intérieur s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 Q = & \underbrace{\alpha \cdot R_G \cdot S_t}_{\text{I}} + \underbrace{(1 - \alpha_{sol}) \tau_{clo} \cdot \alpha_p \cdot R_G \cdot F_{sol/T} \cdot S_{sol}}_{\text{II}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{pw/T} \cdot S_{pw} \cdot T_{pw}^4}_{\text{III}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{pe/T} \cdot S_{pe} \cdot T_{pe}^4}_{\text{IV}} \\
 & + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{ps/T} \cdot S_{ps} \cdot T_{ps}^4}_{\text{V}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{pn/T} \cdot S_{pn} \cdot T_{pn}^4}_{\text{VI}} + \underbrace{\varepsilon_t \cdot \sigma \cdot S_t \cdot T_c^4}_{\text{VII}} + \underbrace{\varepsilon_t \cdot \varepsilon_s \cdot F_{sol/T} \cdot S_{sol} \cdot \sigma \cdot T_{sol}^4}_{\text{VIII}} \\
 & - \underbrace{2 \cdot \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot S_t \cdot T_t^4}_{\text{IX}} . \tag{II.45}
 \end{aligned}$$

Où la part de rayonnement solaire absorbée par le toit s'exprime par :

I : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet du rayonnement solaire incident.

II : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet du rayonnement réfléchi par le sol.

Alors que les puissances, de rayonnement de grande longueur d'onde, absorbée par le toit proviennent :

III : de la paroi ouest ;

IV : de la paroi est ;

V : de la paroi sud ;

VI : de la paroi nord ;

VII : de la voûte céleste ;

VIII : de la surface du sol ;

Et la puissance rayonnée par cette couverture du toit s'exprime par **IX**.

8.2. Bilan d'énergie du sol intérieur

Le bilan énergétique du sol intérieur de la serre s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned}
 Q = & \underbrace{\tau_{\text{clo}} * \alpha_{\text{sol}} * R_G * S_{\text{sol}}}_{\text{I}} + \underbrace{\varepsilon_t * \varepsilon_s * F_{\text{T/sol}} * \sigma * S_T * T_T^4}_{\text{II}} + \underbrace{\varepsilon_t * \varepsilon_s * \sigma * F_{\text{PE/S}} * S_{\text{PE}} * T_{\text{PE}}^4}_{\text{III}} - \underbrace{\varepsilon_t * \sigma * S_{\text{sol}} * T_{\text{sol}}^4}_{\text{IV}} \\
 & + \underbrace{\varepsilon_t * \varepsilon_s * \sigma * F_{\text{PW/S}} * S_{\text{PW}} * T_{\text{PW}}^4}_{\text{V}} + \underbrace{\varepsilon_t * \varepsilon_s * \sigma * F_{\text{PN/S}} * S_{\text{PN}} * T_{\text{PN}}^4}_{\text{VI}} + \underbrace{\varepsilon_t * \varepsilon_s * \sigma * F_{\text{PS/S}} * S_{\text{PS}} * T_{\text{PS}}^4}_{\text{VII}} \quad (\text{II.46})
 \end{aligned}$$

Où la part du rayonnement solaire absorbée par le sol s'exprime par :

I : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet de rayonnement solaire incident.

Alors que les puissances, de rayonnement de grande longueur d'onde, absorbées par le sol proviennent :

II : de la surface du toit ;

III : de la paroi est ;

V : de la paroi ouest ;

VI : de la paroi nord ;

VII : de la paroi sud ;

Et la puissance rayonnée par le sol s'exprime par : **IV**

8.3. Bilan d'énergie de la paroi EST

La paroi *Est* de la serre échange de la chaleur par convection avec l'air extérieur et intérieur, et par rayonnement de grandes longueurs d'ondes avec les surfaces environnantes et la voûte céleste, alors qu'elle reçoit un rayonnement de courtes longueurs d'ondes provenant du soleil.

Le flux de chaleur convectif communiqué à l'air intérieur s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 Q = & \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{T/E} * S_T * T_T^4}_{\text{I}} + \underbrace{(1 - \alpha_{sol}) \tau_{clo} * \alpha_p * R_G * F_{so/E} * S_{sol}}_{\text{II}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{PW/E} * S_{PW} * T_{PW}^4}_{\text{III}} \\
 & + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{PN/E} * S_{PN} * T_{PN}^4}_{\text{IV}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{PS/E} * S_{PS} * T_{PS}^4}_{\text{V}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{sol/E} * S_{sol} * T_{sol}^4}_{\text{VI}} + \underbrace{\varepsilon_t * \sigma * S_E * T_c^4}_{\text{VII}} \\
 & - \underbrace{\varepsilon_t * \sigma * S_E * T_E^4}_{\text{VIII}}
 \end{aligned} \tag{II.47}$$

Où le rayonnement solaire absorbée par la paroi *Est* s'exprime par :

II : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet du rayonnement solaire réfléchi par le sol.

Alors que les puissances, de rayonnement de grande longueur d'onde, absorbées par la paroi *Est* proviennent :

I : de la surface du toit ;

III : de la paroi ouest ;

IV : de la paroi nord ;

V : de la paroi sud ;

VI : de la surface du sol ;

VII : de la voûte céleste ;

Et la puissance rayonnée par la paroi *Est* s'exprime par **VIII**.

8.4. Bilan d'énergie de la paroi OUEST

La paroi *Ouest* de la serre échange de la chaleur par convection avec l'air extérieur et intérieur, et par rayonnement de grandes longueurs d'ondes avec les surfaces environnantes et la voûte céleste, alors qu'elle reçoit un rayonnement de courtes longueurs d'ondes provenant du soleil.

Le flux de chaleur convectif communiqué à l'air intérieur s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 Q = & \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{T/W} * S_T * T_T^4}_{\text{I}} + \underbrace{(1 - \alpha_{sol}) \tau_{clo} * \alpha_p * R_G * F_{sol/W} * S_{sol}}_{\text{II}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{PE/W} * S_{PE} * T_{PE}^4}_{\text{III}} \\
 & + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{PN/W} * S_{PN} * T_{PN}^4}_{\text{IV}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{PS/W} * S_{PS} * T_{PS}^4}_{\text{V}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 * \sigma * F_{sol/W} * S_{sol} * T_{sol}^4}_{\text{VI}} + \underbrace{\varepsilon_t * \sigma * S_W * T_c^4}_{\text{VII}} \\
 & - \underbrace{\varepsilon_t * \sigma * S_W * T_W^4}_{\text{VIII}}
 \end{aligned} \tag{II.48}$$

Où le rayonnement solaire absorbée par la paroi *Ouest* s'exprime par :

II : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet du rayonnement solaire réfléchi par le sol.

Alors que les puissances, de rayonnement de grande longueur d'onde, absorbées par la paroi *Ouest* proviennent :

I : de la surface du toit ;

III : de la paroi est ;

IV : de la paroi nord ;

V : de la paroi sud ;

VI : de la surface du sol ;

VII : de la voûte céleste ;

Et la puissance rayonnée par la paroi *Ouest* s'exprime par **VIII**.

8.5. Bilan d'énergie de la paroi SUD

La paroi *Sud* de la serre échange de la chaleur par convection avec l'air extérieur et intérieur, et par rayonnement de grandes longueurs d'ondes avec les surfaces environnantes et la voûte céleste, alors qu'elle reçoit un rayonnement de courtes longueurs d'ondes provenant du soleil.

Le flux de chaleur convectif communiqué à l'air intérieur s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 Q = & \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{T/S} \cdot S_T \cdot T_T^4}_{\text{I}} + \underbrace{(1 - \alpha_{\text{sol}}) \tau_{\text{clo}} \cdot \alpha_p \cdot R_G \cdot F_{\text{sol}/S} \cdot S_{\text{sol}}}_{\text{II}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{\text{PE}/S} \cdot S_{\text{PE}} \cdot T_{\text{PE}}^4}_{\text{III}} \\
 & + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{\text{PN}/S} \cdot S_{\text{PN}} \cdot T_{\text{PN}}^4}_{\text{IV}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{\text{PW}/S} \cdot S_{\text{PW}} \cdot T_{\text{PW}}^4}_{\text{V}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \cdot \sigma \cdot F_{\text{sol}/S} \cdot S_{\text{sol}} \cdot T_{\text{sol}}^4}_{\text{VI}} + \underbrace{\varepsilon_t \cdot \sigma \cdot S_S \cdot T_c^4}_{\text{VII}} \\
 & - \underbrace{\varepsilon_t \cdot \sigma \cdot S_S \cdot T_s^4}_{\text{VIII}} \tag{II.49}
 \end{aligned}$$

Où le rayonnement solaire absorbée par la paroi *Sud* s'exprime par :

II : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet du rayonnement solaire réfléchi par le sol.

Alors que les puissances, de rayonnement de grande longueur d'onde, absorbées par la paroi *Sud* proviennent :

I : de la surface du toit ;

III : de la paroi est ;

IV : de la paroi nord ;

V : de la paroi ouest ;

VI : de la surface du sol ;

VII : de la voûte céleste ;

Et la puissance rayonnée par la paroi *Sud* s'exprime par **VIII**.

8.6. Bilan d'énergie de la paroi NORD

La paroi *Nord* de la serre échange de la chaleur par convection avec l'air extérieur et intérieur, et par rayonnement de grandes longueurs d'ondes avec les surfaces environnantes et la voûte céleste, alors qu'elle reçoit un rayonnement de courtes longueurs d'ondes provenant du soleil.

Le flux de chaleur convectif communiqué à l'air intérieur s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 Q = & \underbrace{\varepsilon_t^2 \sigma F_{T/N} S_T T_T^4}_{\text{I}} + \underbrace{(1 - \alpha_{\text{sol}}) \tau_{\text{clo}} \alpha_p R_G F_{\text{sol}/N} S_{\text{sol}}}_{\text{II}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \sigma F_{\text{PE}/N} S_{\text{PE}} T_{\text{PE}}^4}_{\text{III}} \\
 & + \underbrace{\varepsilon_t^2 \sigma F_{\text{PW}/N} S_{\text{PW}} T_{\text{PW}}^4}_{\text{IV}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \sigma F_{\text{PS}/N} S_{\text{PS}} T_{\text{PS}}^4}_{\text{V}} + \underbrace{\varepsilon_t^2 \sigma F_{\text{sol}/N} S_{\text{sol}} T_{\text{sol}}^4}_{\text{VI}} + \underbrace{\varepsilon_t \sigma S_N T_c^4}_{\text{VII}} \\
 & - \underbrace{\varepsilon_t \sigma S_N T_N^4}_{\text{VIII}} \tag{II.50}
 \end{aligned}$$

Où le rayonnement solaire absorbée par la paroi *Nord* s'exprime par :

II : qui correspond à la puissance absorbée sous l'effet du rayonnement solaire réfléchi par le sol.

Alors que les puissances, de rayonnement de grande longueur d'onde, absorbées par la paroi *Nord* proviennent :

I : de la surface du toit ;

III : de la paroi est ;

IV : de la paroi ouest ;

V : de la paroi sud ;

VI : de la surface du sol ;

VII : de la voûte céleste ;

Et la puissance rayonnée par la paroi *Nord* s'exprime par **VIII**.

9.conclusion

Dans ce chapitre il a été question de déterminer les flux de chaleur convectifs communiqués par les parois à l'air intérieur de la serre.

Pour ce faire, des bilans thermiques ont été effectués sur les parois constituant la serre.

*Chapitre III : Simulation des
écoulements de l'air refroidi
dans la serre*

1. Introduction

Les serres agricoles constituent un système biologique et énergétique complexe dans lequel la plupart des modes de transfert thermiques sont mis en jeu :

- Conduction à travers le sol ;
- Convection au niveau de la surface de la couverture, des plantes et du sol ;
- Évaporation au niveau des plantes et du sol ;
- Condensation sur la couverture et parfois sur le végétal ;
- Apport solaire à travers les matériaux de couverture ;
- Échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différentes surfaces.

Le contrôle de l'état hydrique d'une culture est l'un des facteurs essentiels dans une serre. L'évapotranspiration joue un rôle fondamental dans les mouvements d'eau et le transport des minéraux dans les plantes. Elle dépend fortement de la distribution de la température et de l'humidité de l'air dans la serre dont une bonne conception peut améliorer le climat intérieur.

On se propose justement dans ce chapitre d'étudier l'effet de l'humidification de l'air sur le refroidissement d'une serre vide.

2. Position du problème

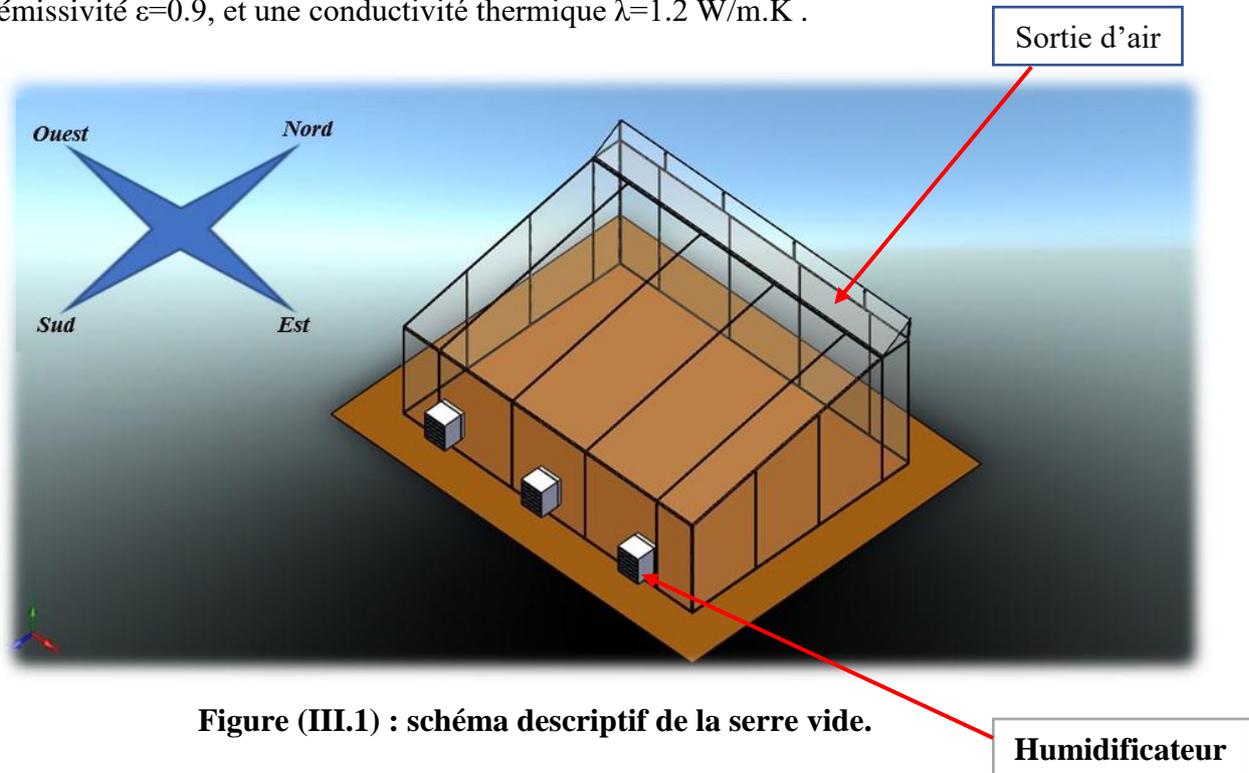
Le renouvellement de l'air à l'intérieur de la serre contribue à l'évacuation de l'énergie excédentaire captée par la serre tout en limitant la surchauffe de l'air intérieur, notamment au cours de la saison estivale. L'impact de l'humidification sur le climat interne de la serre et sur la culture sous abris est très important, particulièrement dans les régions sèches et chaudes.

Cette étude a pour but d'observer à travers une simulation le comportement d'une serre implantée dans une région sèche et chaude. Pour ce faire, on a adapté les conditions suivantes :

- l'air extérieur est considéré avec un degré d'hygrométrie de 20%, et une température de 45°C ;
- le soleil est supposé très haut dans le ciel (midi solaire) avec une puissance $R_g=1000 \text{ W/m}^2$;
- l'air intérieur de la serre est renouvelé par le biais de trois humidificateurs qui peuvent fournir des débits d'air variant de 1.5 à 12kg/s, avec une hygrométrie de 80%, et une température de 27°C.

3. Description de la serre étudiée

La serre étudiée est supposée vide de dimension $16*12*4.25\text{m}^3$, comportant trois humidificateurs placés du côté sud à 50cm du sol, et une sortie d'air du côté nord de dimension $1.5*16\text{m}^2$. Les parois de la serre sont en verre de 4mm d'épaisseur ayant une émissivité $\varepsilon=0.9$, et une conductivité thermique $\lambda=1.2\text{ W/m.K}$.



4. Simulations

4.1. Maillage du domaine

La réalisation de la géométrie ainsi que son maillage sont effectuées par le logiciel GAMBIT. Toutefois le choix du maillage dépend de la complexité de la géométrie.

Pour notre cas, le maillage de la serre généré est de types pave (maillage non structuré), les mailles sont de 10cm de côtés, et leur densité augmente dans les zones où le gradient de vitesse et de température est plus important. En effet le maillage est affiné au niveau des entrées et de la sortie d'air et au niveau du toit de la serre (Figure III.2).

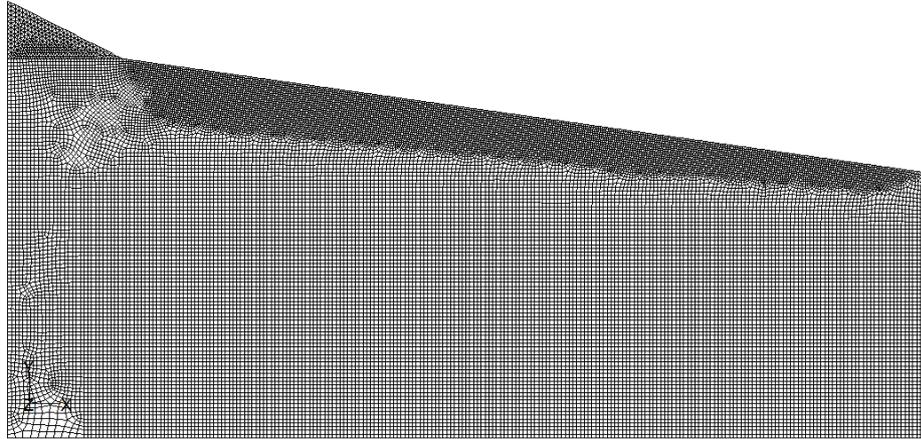


Figure (III.2) : maillage de la serre.

4.2. Conditions aux limites

Fluent donne le choix entre un certain nombre de types de conditions aux limites, très différentes.

Pour les conditions climatiques considérées on impose :

a) Condition à l'entrée (sorties d'humidificateurs) : Les conditions à l'entrée sont la température de l'air $T = 27^{\circ}\text{C}$ et l'humidité absolue $\omega = 0.0195 \text{Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{airsec}}$ (HR= 80%).

b) Conditions aux limites au niveau des parois : Elles sont introduites par le biais d'UDF (User defined fonction). Ces derniers intègrent des termes sources de chaleur qui correspondent au flux de chaleur net résultant des bilans radiatifs et convectifs (équations II.45 à II.50).

Par ailleurs, afin de mettre à rude épreuve le système de refroidissement envisagé, on a considéré :

- une convection naturelle sur l'ensemble des surfaces de la serre.
- la surface du sol est adiabatique.

5. Résultats

5.1. Climat intérieur

La figure (III.3) montre l'évolution de la température moyenne de l'air intérieur avec le débit d'air. Il apparaît que l'air refroidi par humidification de $T=45^{\circ}\text{C}$ et HR=20% à $T=27^{\circ}\text{C}$ et HR=80% procure au climat intérieur de la serre un refroidissement conséquent. Il est de l'ordre

de 17°C par rapport au cas sans refroidissement. De plus, l'augmentation du débit d'air accentue l'effet du refroidissement.

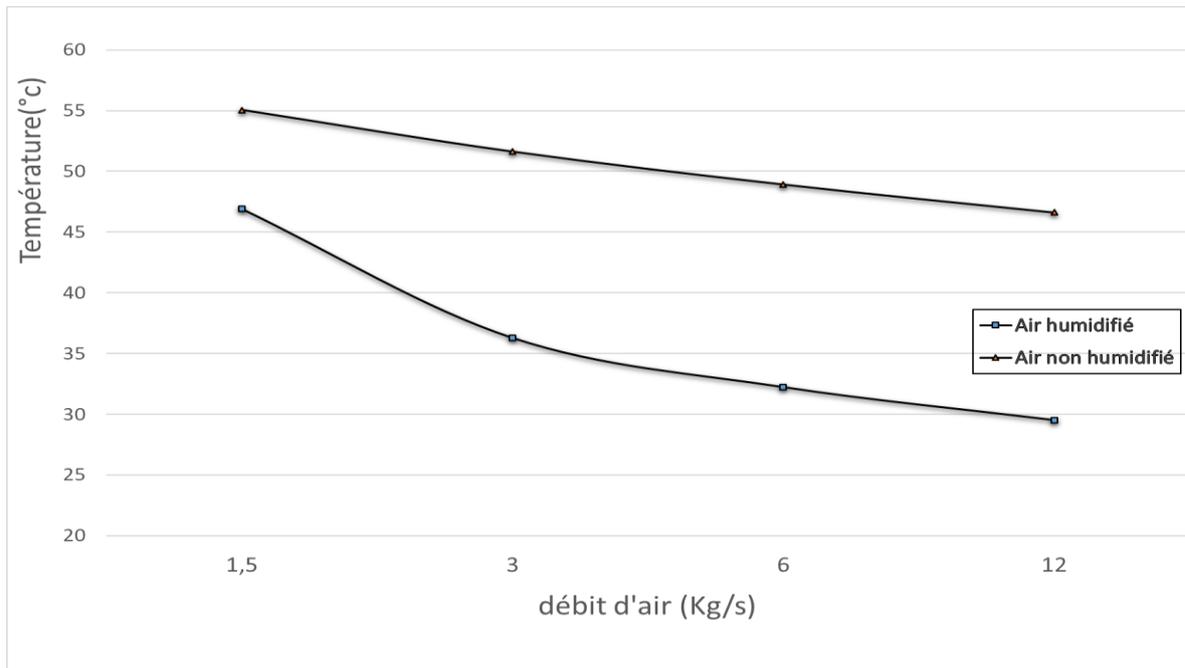


Figure (III.3) : évolution de la température moyenne de l'air intérieur de la serre avec l'évolution du débit d'air injecté.

Pour le cas d'une serre vide, on pourrait se limiter à un débit d'air de 6kg/s qui donne une température de l'air intérieur d'environ 32°C. En effet, pour une serre de culture, l'évapotranspiration des feuilles du végétal combiné au refroidissement évaporatif donneraient des niveaux de température inférieurs à 32°C.

Par ailleurs, pour ce débit de 6Kg/s, en supposant l'air extérieur à une température et hygrométrie constantes (45°C et 20%) durant 8 heures de la journée, la quantité d'eau nécessaire aux humidificateurs sera :

$$q = (\omega_{80\%} - \omega_{20\%}) \cdot \dot{m}_{\text{air}} \cdot t$$

Où :

$\dot{m}_{\text{air}} = 6\text{kg/s}$ débit d'air insufflé par les humidificateurs.

$t = 8\text{h}$ durée d'humidification.

$$\omega_{80\%} = 0.0195 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$$

$$\omega_{20\%} = 0.0122 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$$

Soit : $q = 1.26 \text{ m}^3$ d'eau/jour.

Pour cette serre de $16 \cdot 12 \cdot 4.25 \text{ m}^3$, seulement 1.26 m^3 d'eau sont nécessaires pour assurer son refroidissement.

5.2. Climat distribué dans la serre

Afin de voir la distribution des champs de température et de vitesse dans la serre, on s'intéressera à différents plans horizontaux et verticaux. Les figures (III.4 et III.5) illustrent les positions de ces plans.

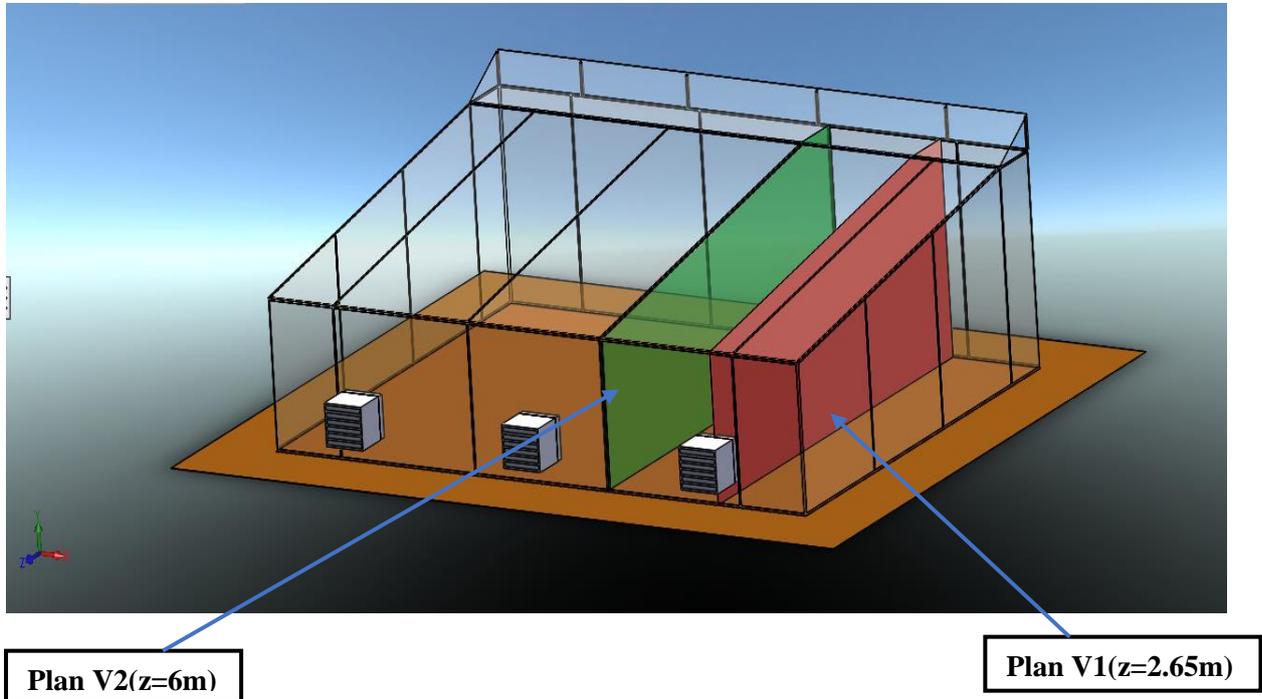


Figure (III.4) : Schématisation des plans verticaux de visualisation.

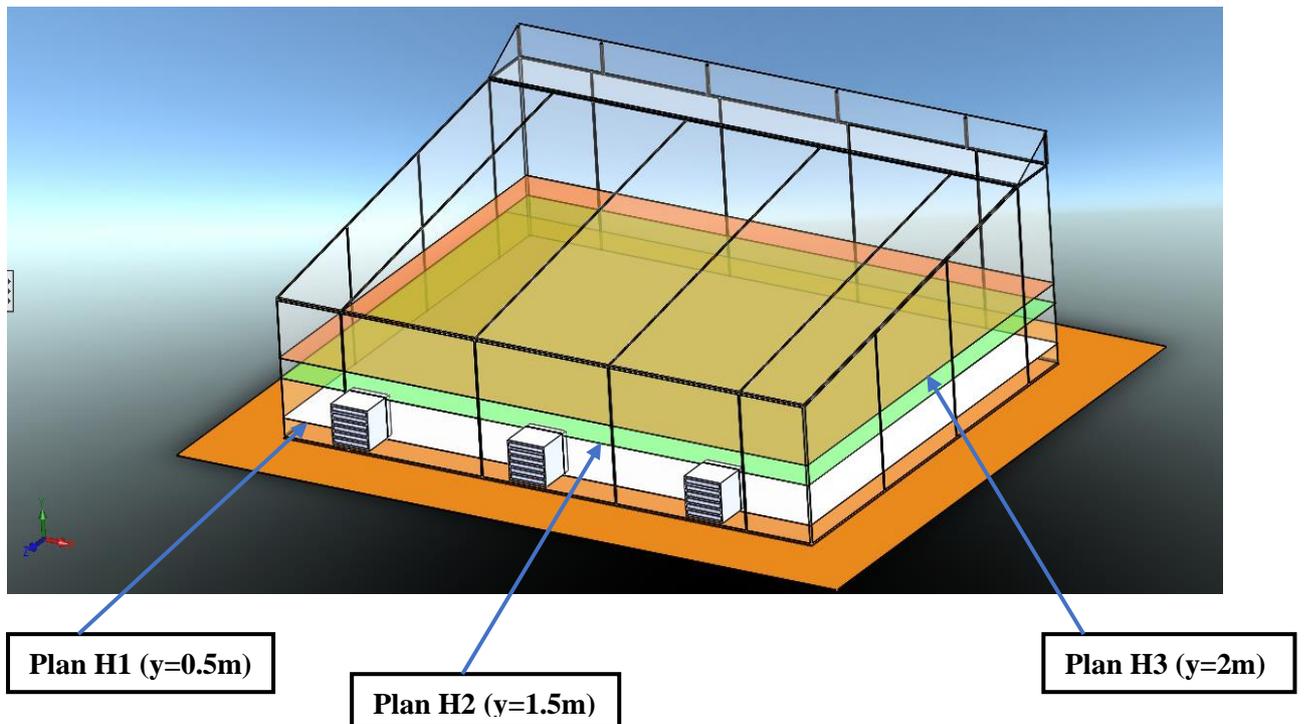


Figure (III.5) : Schématisation des plans horizontaux de visualisation.

•plans horizontaux (air humidifié)

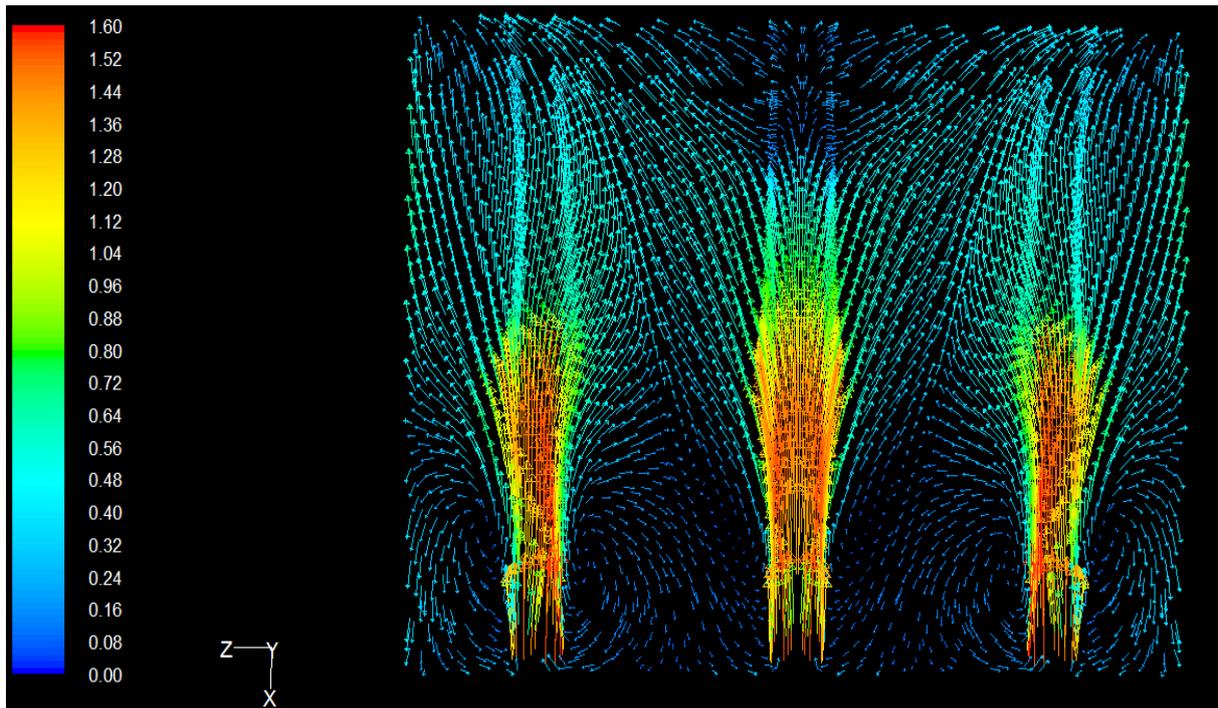


Figure (III.6.A) : Distribution du champ de vitesse sur un plan horizontal H1 ($y=0.5m$).

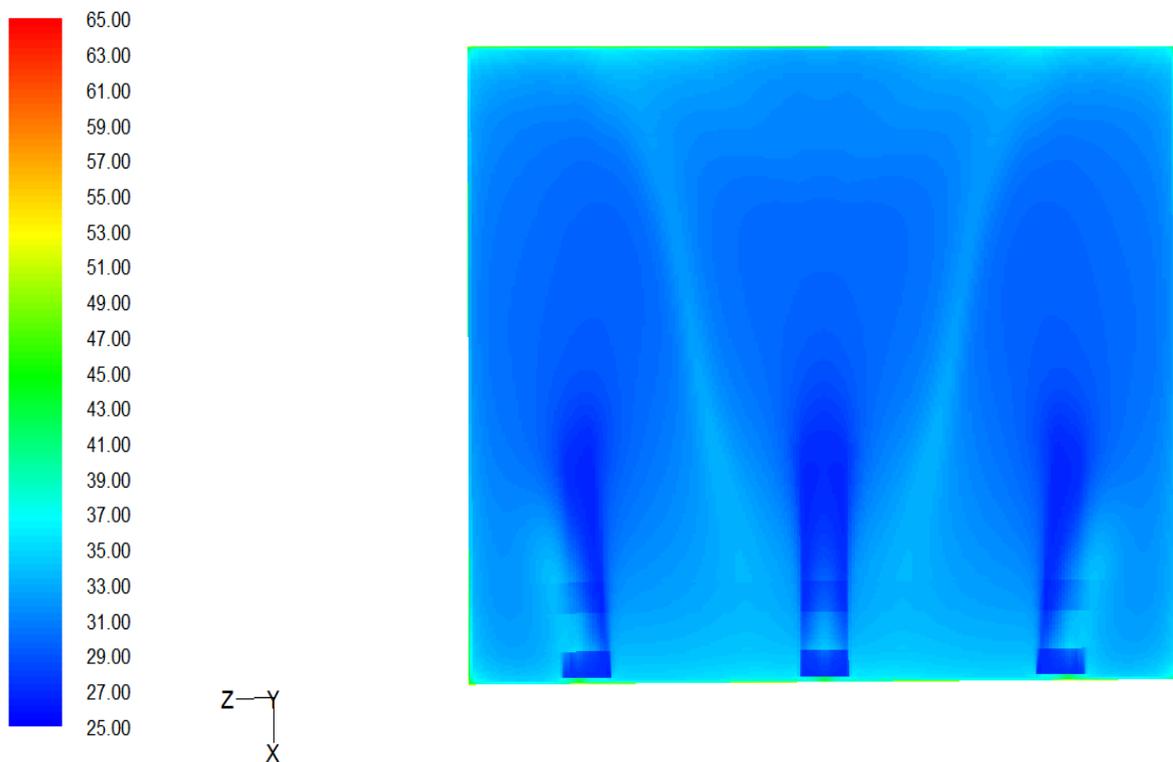


Figure (III.6.B) : Distribution Du champ de température sur un plan horizontal H1 ($y=0.5m$).

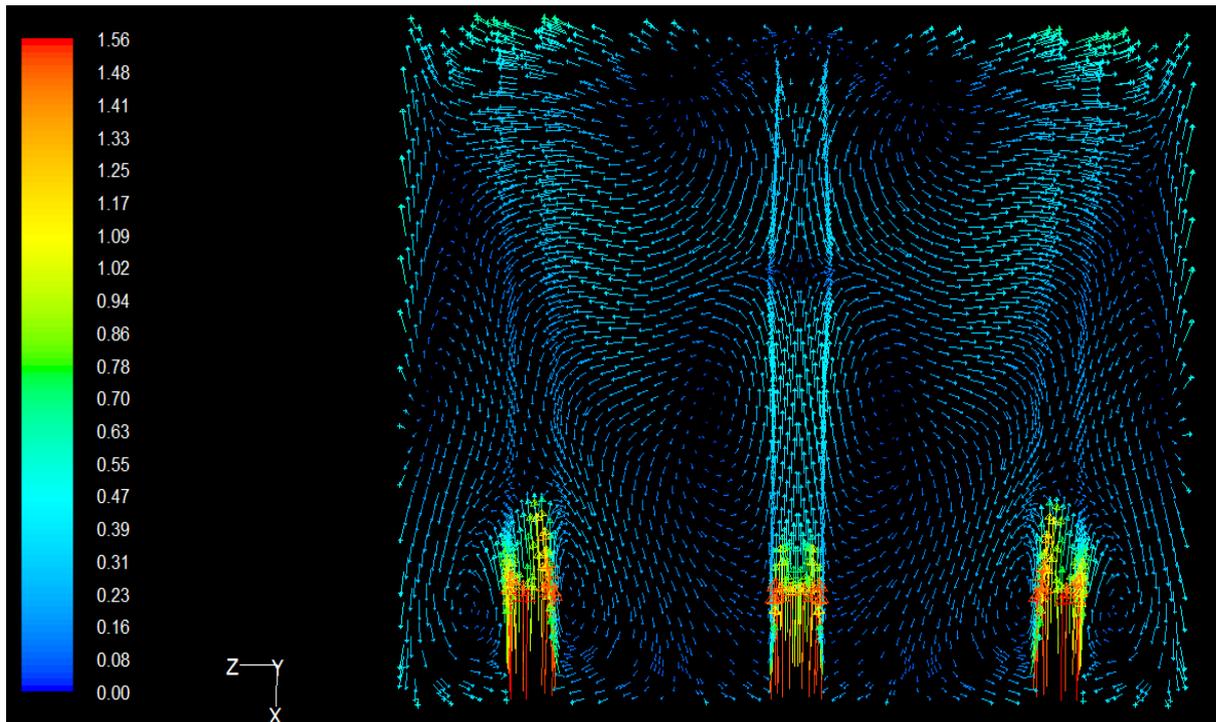


Figure (III.7.C) : Distribution du champ de vitesse sur un plan horizontal H2 (y=1.5m).

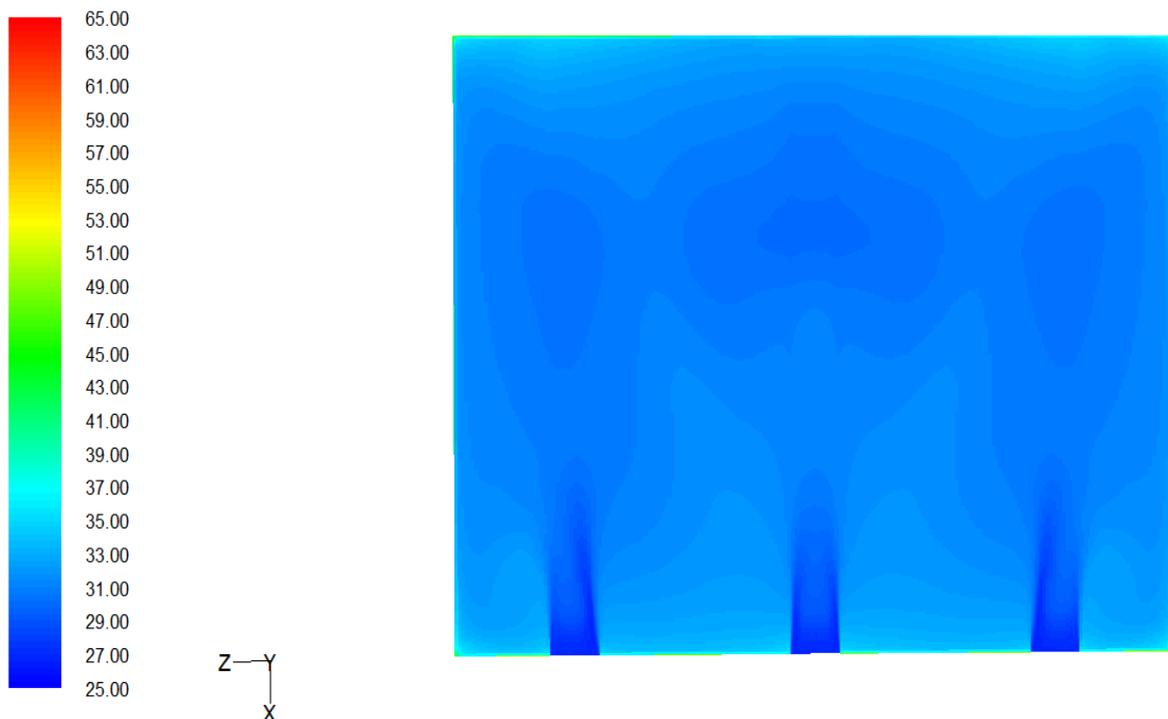


Figure (III.7.D) : Distribution Du champ de température sur un plan horizontal H2(y=1.5m).

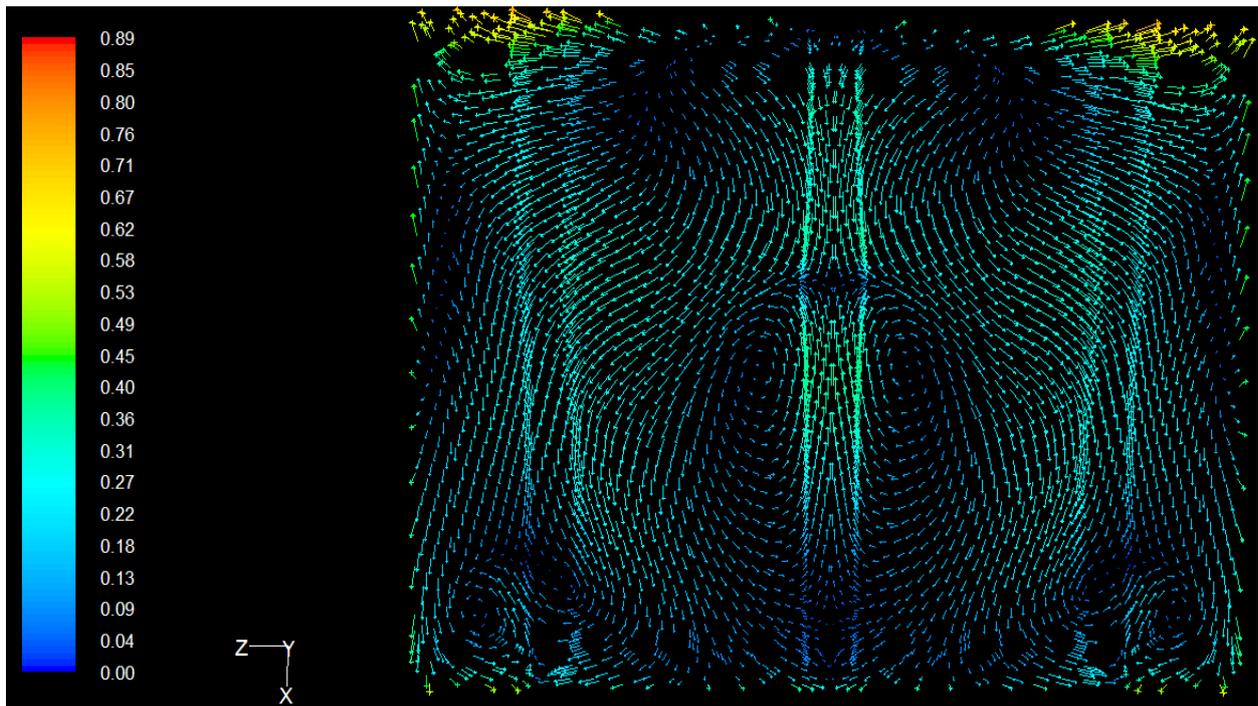


Figure (III.8.E) : Distribution du champ de vitesse sur un plan horizontal H3 (y=2m).

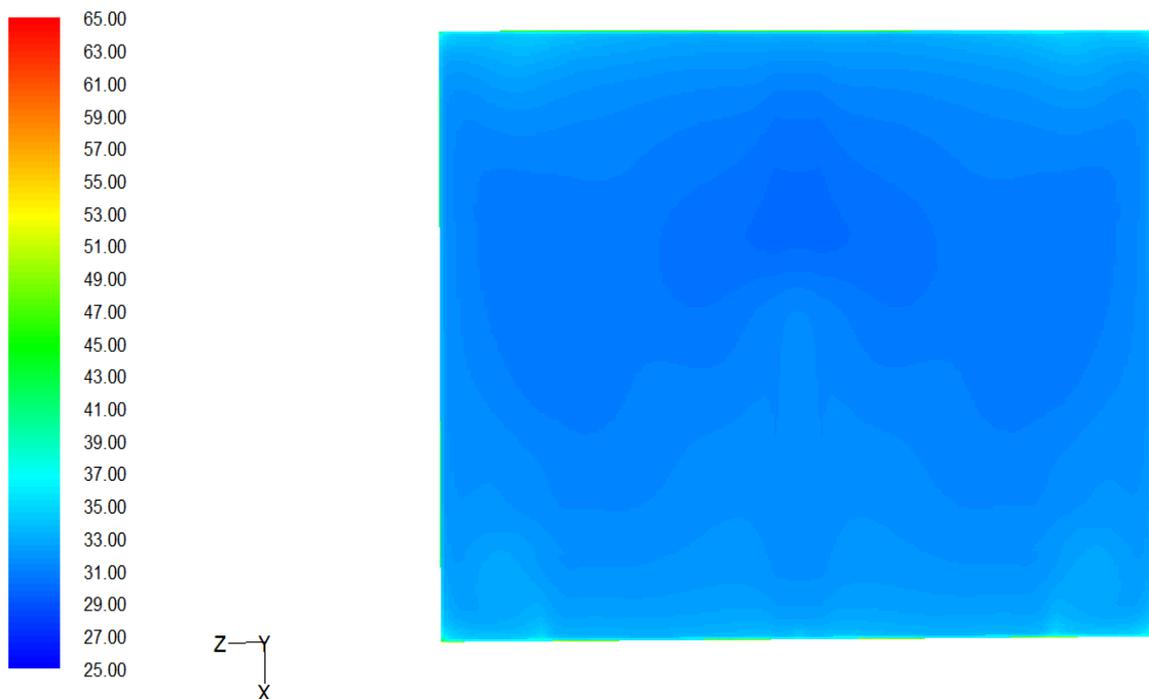


Figure (III.8.F) : Distribution Du champ de température sur un plan horizontal H3(y=2m).

•Plans verticaux :

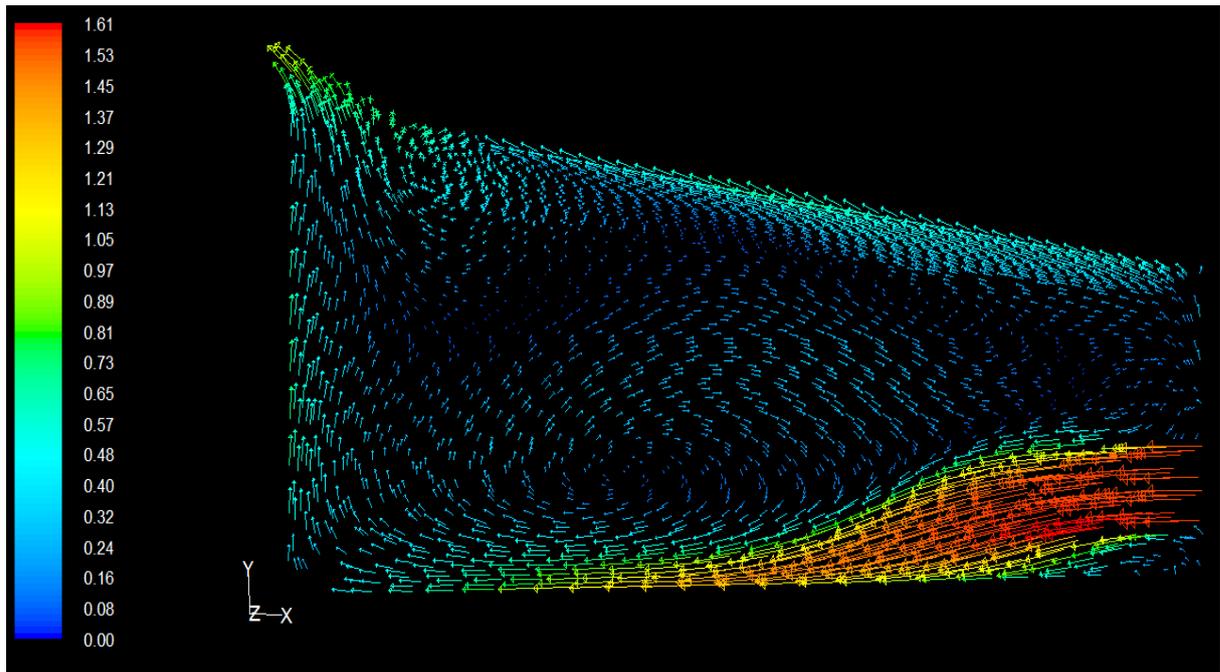


Figure (III.9.A) : Distribution du champ de vitesse sur un plan vertical médian à un humidificateur (plan V1, $z=2.65\text{m}$).

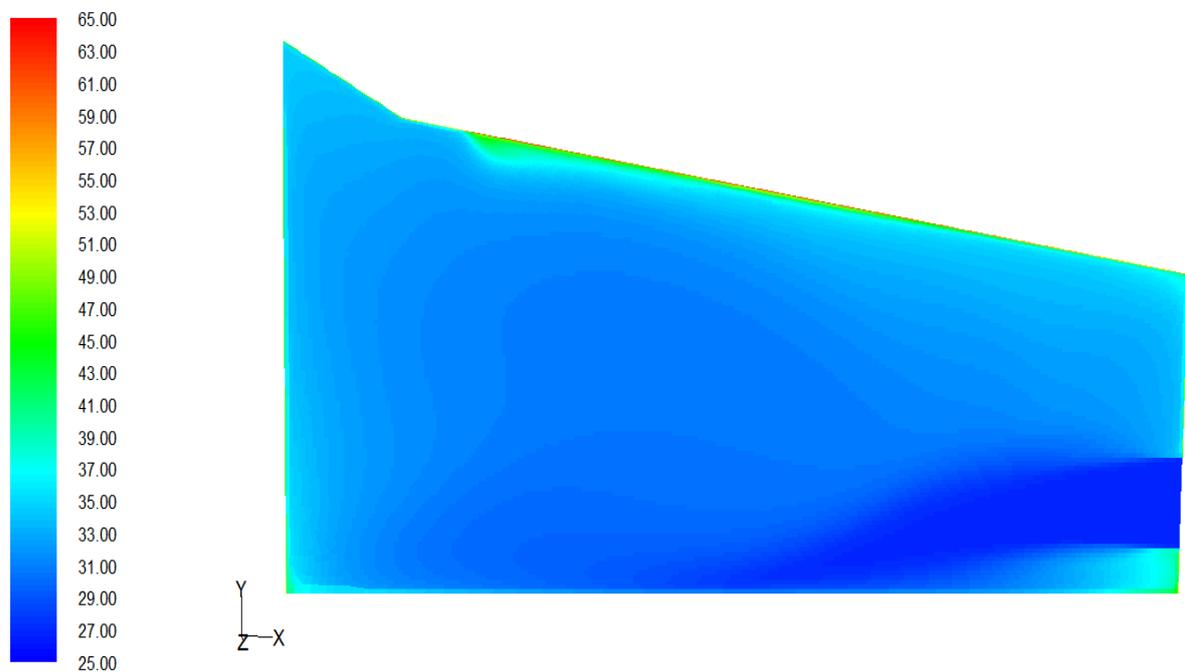


Figure (III.9.B) : Distribution du champ de température sur un plan vertical médian à un humidificateur (plan V1, $z=2.65\text{m}$).

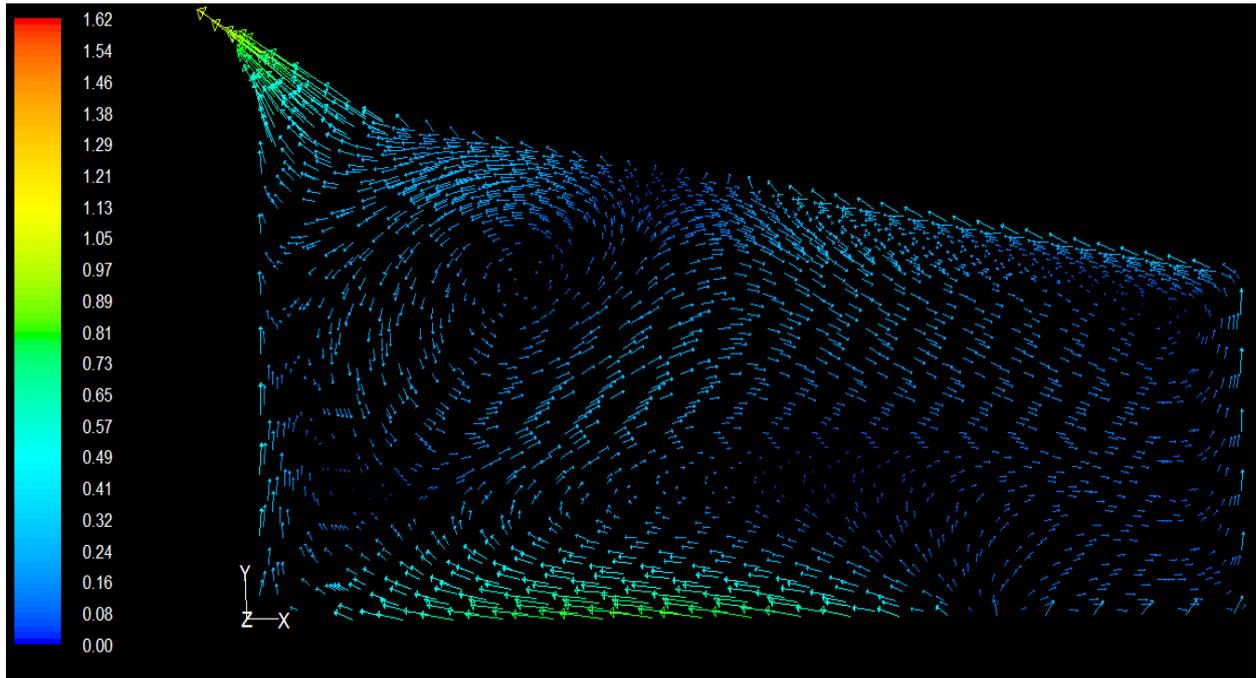


Figure (III.10.A) : Distribution du champ de vitesse sur un plan vertical médian à deux humidificateurs (plan V2, $z=6\text{m}$).

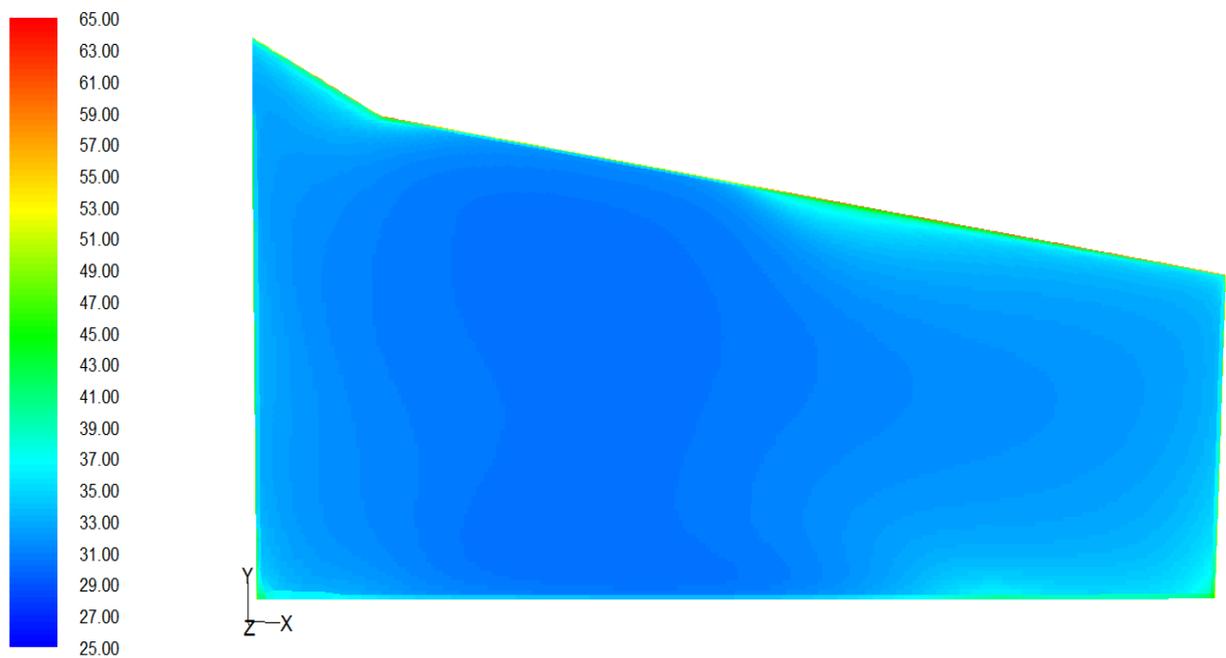


Figure (III.10.B) : Distribution du champ de température sur un plan vertical médian à deux humidificateurs (plan V2, $z=6\text{m}$).

Les figures illustrées en (figure III.6 à III.10) montrent la distribution du climat intérieur de la serre. On distingue sur le plan horizontal ($y=0.5\text{m}$) situé au niveau des humidificateurs, que les intensités des vitesses sont importantes (figure III.6.A) ce qui permet une meilleure circulation de l'air et donc l'homogénéisation des paramètres climatiques (figure III.6.B).

Juste au-dessus des humidificateurs, sur le plan situé à une hauteur de 1.5m du sol, les vitesses d'écoulement de l'air sont légèrement plus faibles (figure III.7.C). Ce qui réduit la circulation de l'air et donc perturbe le champ de température (figure III.7.D).

Par contre, loin des humidificateurs, à hauteur de 2m du sol, les vitesses d'écoulement de l'air assez faibles (figure III.8.E) occasionnent un léger réchauffement de l'air (figure III.8.F).

Le même constat est observé sur les plans verticaux. Sur le plan vertical situé au niveau de l'humidificateur (plan V1 figure III.9) la circulation de l'air est meilleure par rapport à l'air confiné entre deux humidificateurs (plan V2 figure III.10). Ce qui offre un meilleur refroidissement de l'air au niveau des humidificateurs.

5.3. Influence du nombre d'humidificateurs

•Champs de température (air humidifié)

•Plans horizontaux

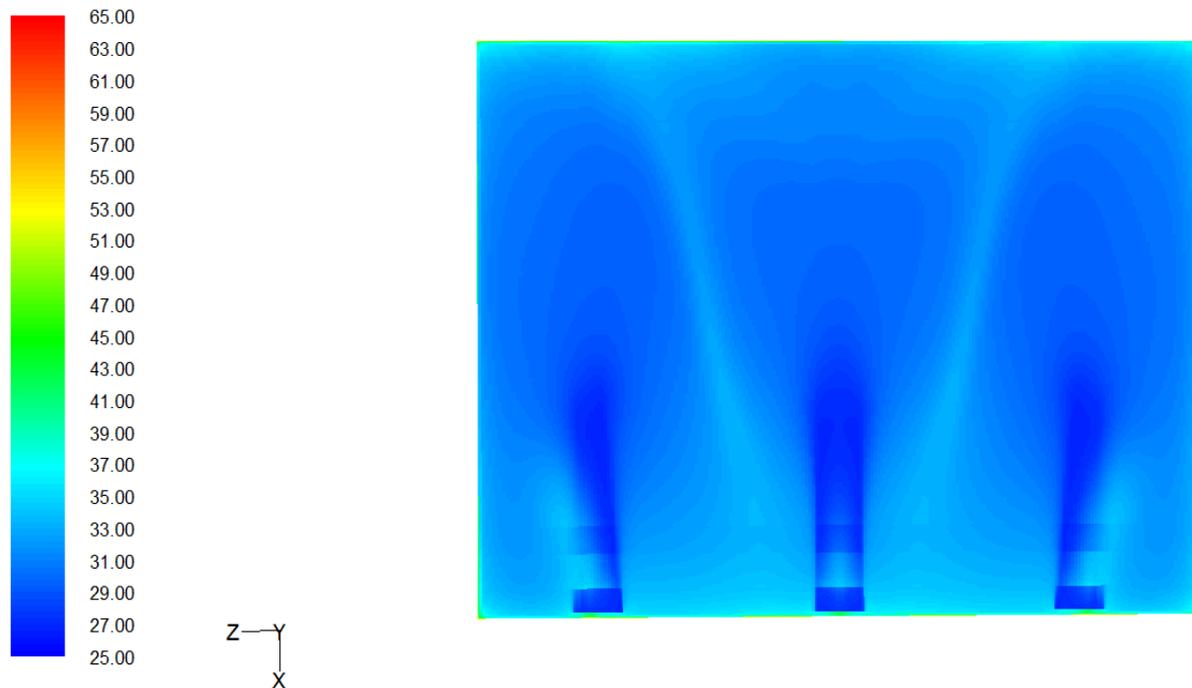


Figure (III.11.A) : Distribution du champ de température sur un plan horizontal H1(y=0.5m) pour le cas de 3 humidificateurs.

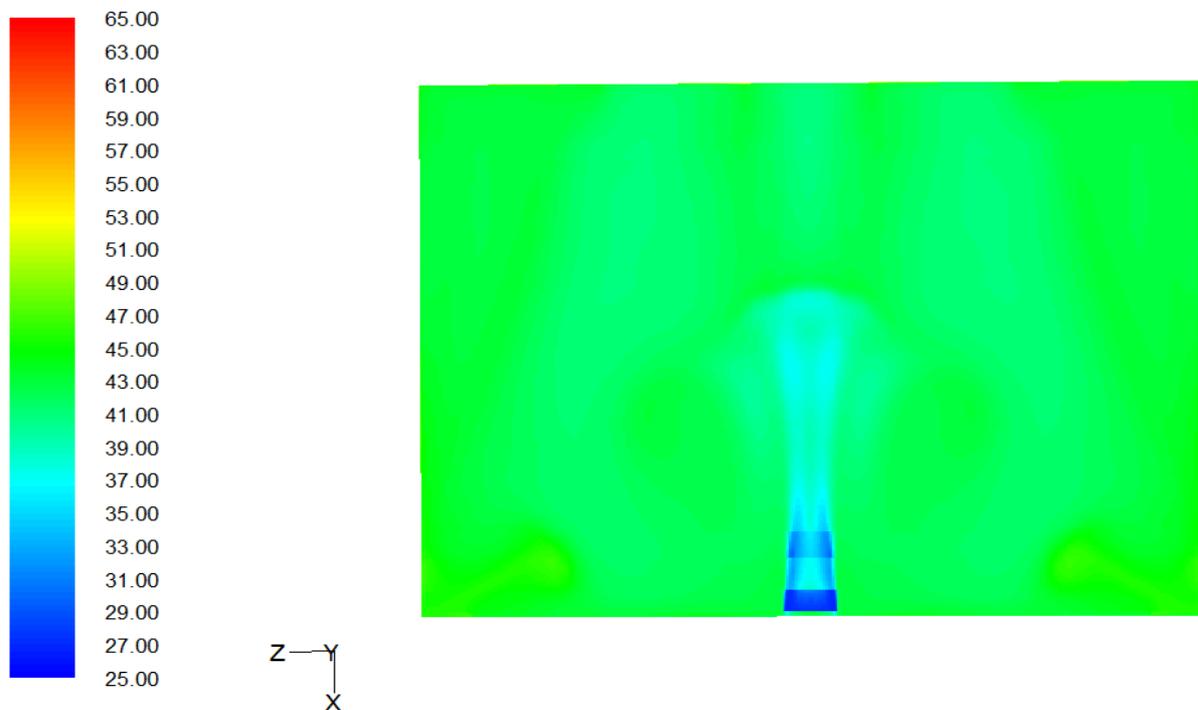


Figure (III.11.B) : Distribution du champ de température sur un plan horizontal H1(y=0.5m) pour le cas d'un seul humidificateur.

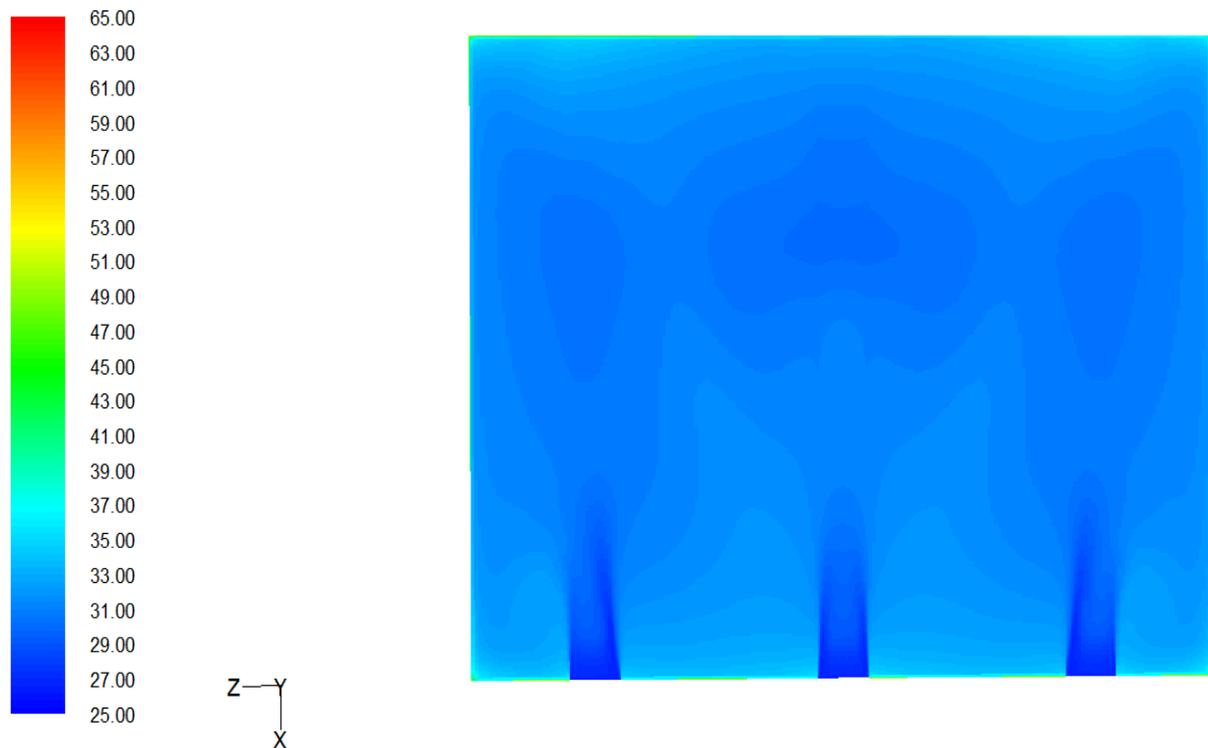


Figure (III.12.A) : Distribution du champ de température sur un plan horizontal $H2(y=1.5\text{m})$ pour le cas de 3 humidificateurs.

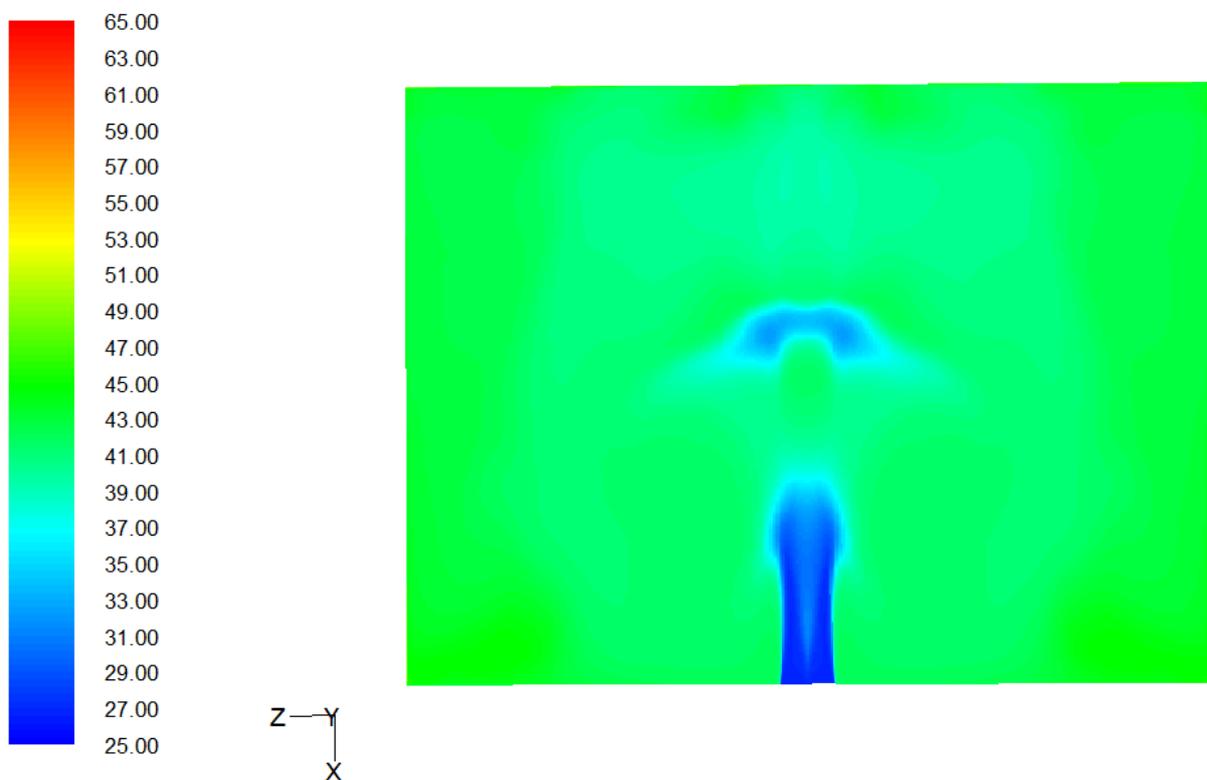


Figure (III.12.B) : Distribution du champ de température sur un plan horizontal $H2(y=1.5\text{m})$ pour le cas d'un seul humidificateur.

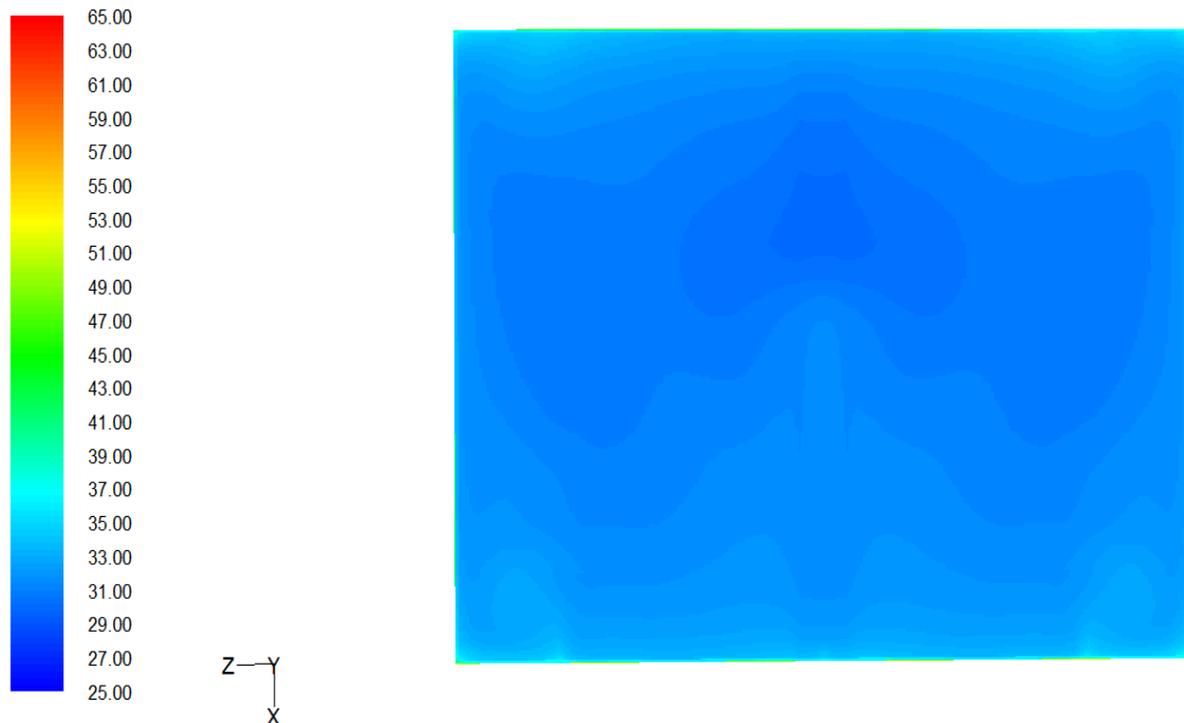


Figure (III.13.A) : Distribution du champ de température sur un plan horizontal $H3(y=2m)$ pour le cas de 3 humidificateurs.

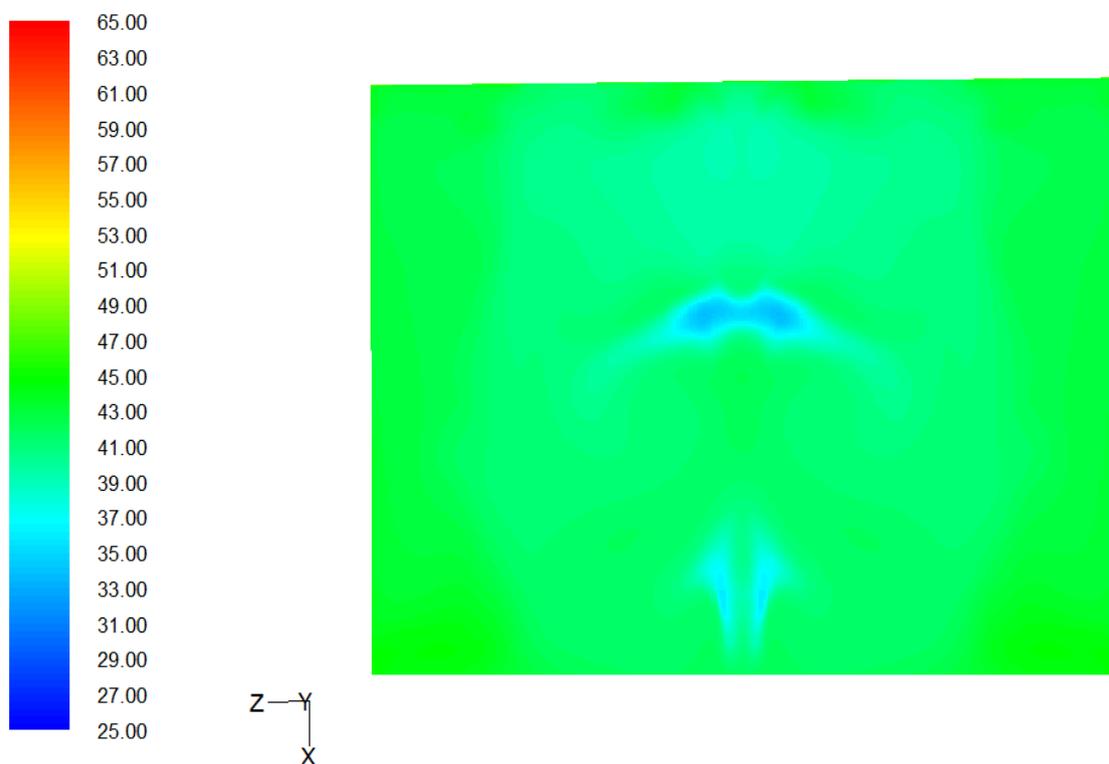


Figure (III.13.B) : Distribution du champ de température sur un plan horizontal $H3(y=2m)$ pour le cas d'un seul humidificateur.

•plans verticaux

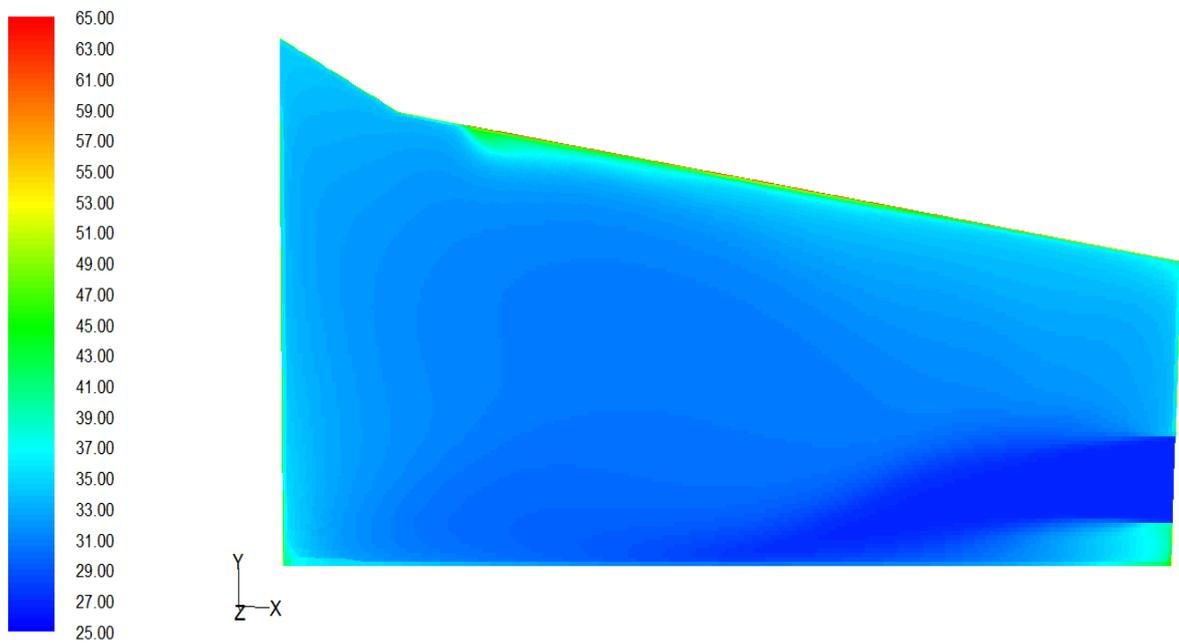


Figure (III.14.A) : Distribution du champ de température sur un plan vertical V1 ($z=2.65\text{m}$) pour le cas de 3 humidificateurs.

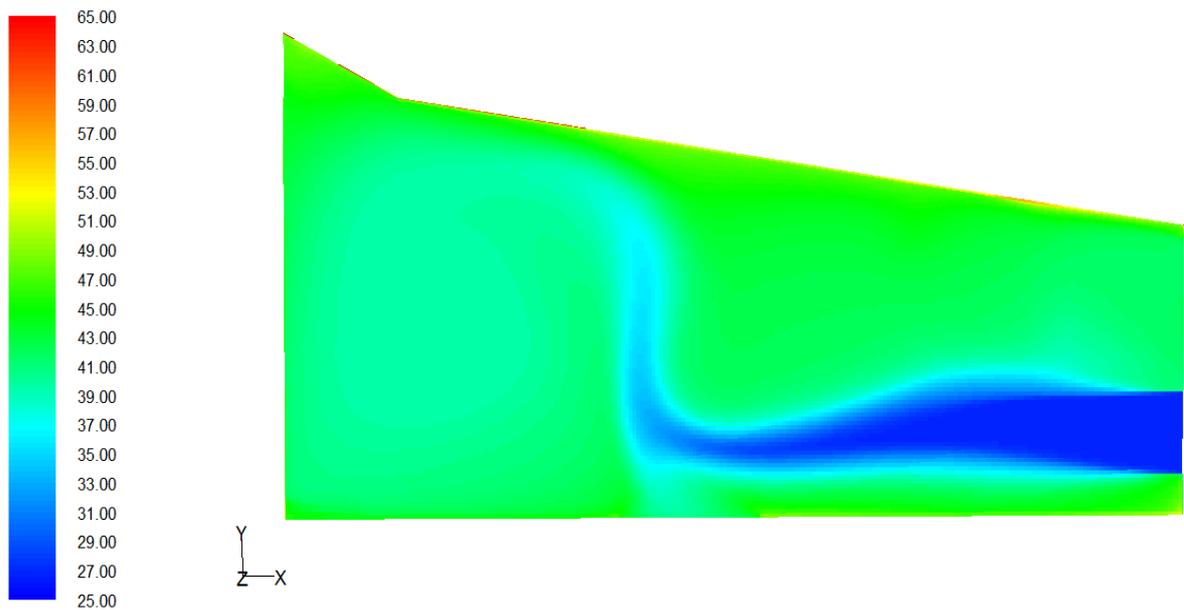


Figure (III.14.B) : Distribution du champ de température sur un plan vertical V1 ($z=2.65\text{m}$) pour le cas d'un seul humidificateur.

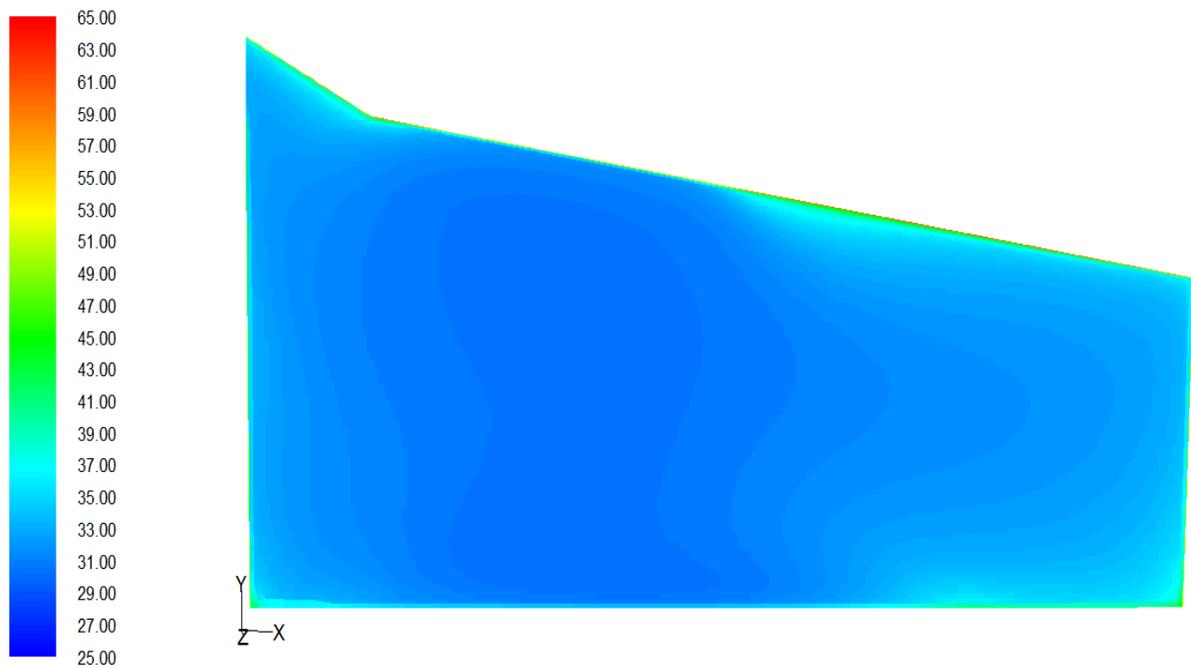


Figure (III.15.A) : Distribution du champ de température sur un plan vertical V2 (z=6m) pour le cas de 3 humidificateurs.

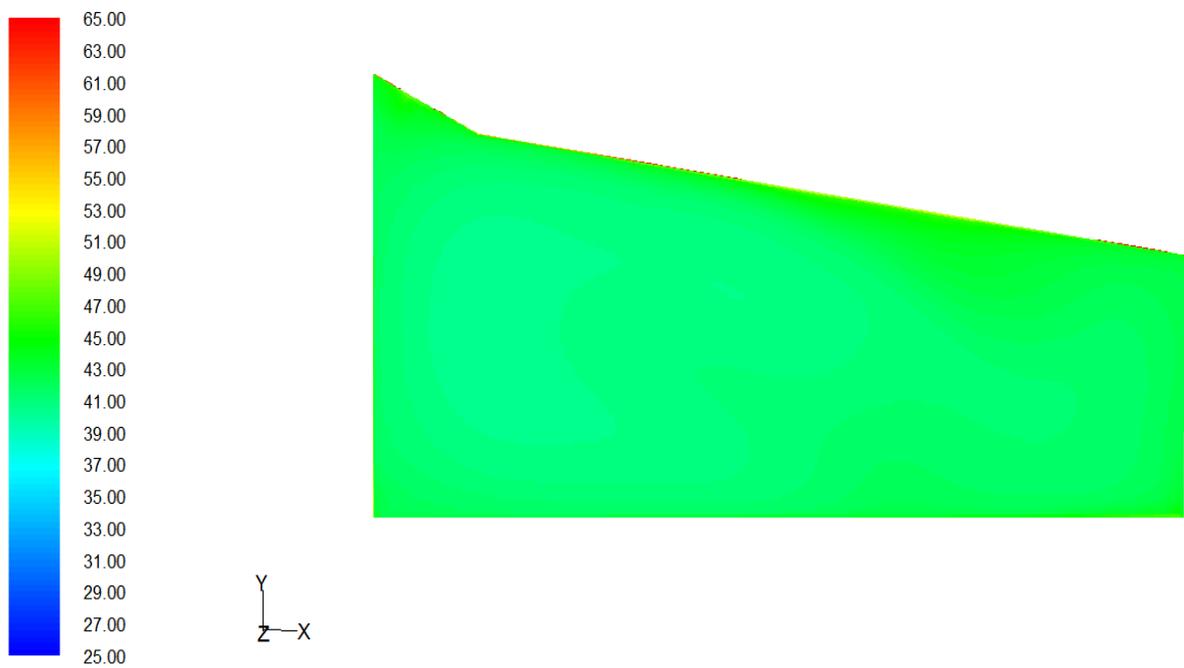


Figure (III.15.B) : Distribution du champ de température sur un plan vertical V2 (z=6m) pour le cas d'un seul humidificateur.

On remarque à travers les figures ci-dessus que pour un débit d'air de 6kg/s insufflé par trois humidificateurs offre un meilleur refroidissement de la serre avec un climat quasi homogène, soit une température moyenne de l'air de l'ordre de 32°C. Par contre, l'utilisation d'un seul humidificateur avec un même débit d'air ne contribue pas efficacement au refroidissement et donne une température moyenne de l'air d'environ 42°C.

Il est donc recommandé de prévoir une disposition judicieuse de plusieurs humidificateurs. Pour notre cas de figure, trois humidificateurs s'avèrent suffisants.

Conclusion générale

Le présent travail consiste en l'étude du refroidissement d'une serre vide refroidie par humidification, sous un climat sec et chaud.

Dans un premier temps, on s'est intéressé aux différents types de serres de culture ainsi qu'aux différents modes de climatisation et de chauffage des serres. Pour notre étude nous avons opté pour un refroidissement par humidification de l'air.

Pour le besoin de simulation des échanges aérauliques dans une serre vide, il a été nécessaire d'introduire sous forme de termes sources dans l'équation de l'énergie, les flux de chaleur convectifs échangés entre les parois de la serre et l'air intérieur, résultant des bilans thermiques.

Par ailleurs, on a considéré une convection naturelle sur les surfaces externes des parois de la serre est un sol adiabatique. L'air extérieur à 45°C avec une hygrométrie HR=20% est refroidi par humidification avant son introduction dans la serre à 27°C et à HR=80%.

En faisant varier le débit d'air insufflé dans la serre, on a mis en évidence l'effet du refroidissement d'une serre vide. Avec un débit de 6 kg/s on atteint une température moyenne de l'air intérieur de seulement 32°C avec une bonne homogénéisation du climat sous des conditions climatiques extrêmes.

En outre, la disposition judicieuse des humidificateurs influe sur le refroidissement de la serre. En effet, l'utilisation de trois humidificateurs au lieu d'un seul, améliore le refroidissement et l'homogénéisation du climat intérieur de la serre.

En perspective, il serait intéressant de reprendre cette étude tout en intégrant des stands de végétation.

Références bibliographiques

- [1] La production sous serre, en 2 tomes (2^e Éd.). Tome 1. La gestion du climat
- [2] A. NISEN. "L'éclairage naturel des serres". Presse Agronomique, Gembloux (1969).
- [3] A. NISEN, R. DOGNIAUX. "Traité de l'éclairage des serres". Institut Royal Météorologique, Bruxelles, (1975).
- [4] H. SINOQUET. "Transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems. In crop structure and light microclimate, characterization and application". INRA Editions, science update (1993), 229-252.
- [5] G. STANHILL et Al. "The radiation balance of a glasshouse rose crop". Agricultural Meteorology (1973), 11 : 385-404.
- [6] M. TCHAMITCHAIN. "Photosynthèse d'une culture de tomate de serre et validation d'un modèle analytique". Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, (1990).
- [7] J. NIJSKENS et Al. "Heat transfer through covering materials of greenhouse". Agricultural and Forest Meteorology. (1984), 33 : 193-214.
- [8] C. KITTAS. "Détermination du coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi d'une serre". (1994), 205-221.
- [9] J. DOLTOUR. "Dynamic modeling of heat and mass transfer in greenhouse". Acta Horticultural (1985), 174: 119-126.
- [10] B. A. KIMBALL. "A modular energy balance program including subroutines for greenhouses and other latent devices". Agricultural research service, (1986).
- [11] Yves JANNOT. "Transferts thermiques". (2002).
- [12] R. HAXAIRE. "Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre". Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, (1999).
- [13] A. KINDELAN et C. KITTAS. "Dynamic modeling of greenhouse environment". Transaction of the ASAE, (1980), 5: 1232-1239.
- [14] J. P. HOLMAN. "Heat Transfer». Sixth edition. Singapore. McGraw Hill International Editions, (1986).
- [15] J. L. MONTEITH, M. H. UNSWORTH. "Principles of Environmental Physics". 2nd ed. Edward Arnold, London, (1990).

- [16] S. ZHU, J. DELTOUR, S. WANG. "Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems". *Aqua cultural Engineering*, (1998), 18:201–217.
- [17] K. V. GARZOLI, J. BLACKWELL. "An Analysis of the Nocturnal Heat Loss from a Single Skin Plastic Greenhouse». *Journal of Agricultural*, (1981), 26 : 203-214.
- [18] Robert BRUN. "Les plastiques en agriculture". (1992).
- [19] J. DUFFIE, A. BECKMAN. "Solar engineering and thermals processes". (1980) : 890-900.
- [20] J. M. CAMASSERIAUX. "Conversion thermique du rayonnement solaire". Paris (1984).
- [21] Y. CORMARY, C. NIKOLAS. " La thermique des serres". Collection de la direction des études et Recherches en France, (1985).
- [22] M. SOUSSI, L. SBITA, M. ANNABI. "Solar energy and environment proceeding". Actes du colloque énergie solaire et environnement Agadir. Maroc, (1996).
- [23] Claude BELORME. "Rayonnement solaire utilisable gisement solaire". France, (1987).
- [24] A. NISEN et AL. " Considérations pratiques sur la transmission du rayonnement solaire et de la chaleur pour les matériaux utilisée en serre". (1986), IRSIA, p. 94.
- [25] A. M. ABDEL-GHANY, T. KOZAI. "Cooling's Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses ". *Laboratory of Environmental Control Engineering, Department of Bioproduction Science. Bio-systems Engineering*, (2006), 94 (1): 97–109.
- [26] A. BAILLE, P. DAUPLE, E. BERNINGER. " INRA et les cultures sous serres", INRA, France, (1985), 100 -190.
- [27] G. PAPADAKIS, A. FRANGOUDAKIS, S. KYRITSIS. "Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover". *Journal of Agricultural Engineering Research*, (1992), 51: 191–205.
- [28] Bernard EYGLUNENT. "Manuel de thermique ». *Ingénieur INPC*, France, (2000).
- [29] C. STANGHELLINI. "Mixed convection above greenhouse crops canopies". *Agricultural and Forest Meteorology*, (1993), 66 : 111–117.
- [30] J.P. CHIAPALE. "Les serres. Bilan radiatif". *Les bases de la Bioclimatologie*. INRA, Paris, (1984), p. 21-23.

- [31] C. KITTAS. " Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des Serres". Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Perpignan, (1980).
- [32] F. KREITH. "Transmission de la chaleur et Thermodynamique". Masson et Cie, Editeurs, Paris, (1967), p 654.
- [33] B. A. KIMBALL. "Simulation of the energy balances a greenhouse". Agricultural Meteorology, (1973), 11 : 243-260.
- [34] M. DAGUENET. "Séchoirs solaires". Unesco Paris, (1985).
- [35] Mohammed Hassan SELLAMI. " Utilisation de l'énergie solaire pour la déminéralisation des eaux saumâtre dans le sud Algérien". Ouargla, (2000).

Annexes

Traitement de la composante directe :

Le traitement de la composante directe est donné géométriques par [21] :

$$I_i = I \cos i \quad ()$$

i : L'angle d'incidence du rayonnement direct ($^{\circ}$).

$$\cos i = \cos(\alpha - a) \cdot \cos \gamma \cdot \cos h + \sin \gamma \cdot \sin h \quad (A.1)$$

a : azimut solaire du plan vertical orienté vers le sud ($^{\circ}$).

α : orientation du plan considéré par rapport au plan sud ($^{\circ}$).

γ : angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal ($^{\circ}$).

h : la hauteur du soleil ($^{\circ}$).

La hauteur du soleil h au-dessus de l'horizon se calcule par la formule suivante : [24]

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi) \quad (A.2)$$

Et l'azimut a par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)}$$

Avec φ latitude du lieu.

La valeur de la déclinaison calculée par [24] :

$$\delta = 23,45 \sin [0,980 (j+284)]. \quad (A.3)$$

δ : Déclinaison ($^{\circ}$).

j : le numéro du jour de l'année.

On définit l'angle horaire ω par :

$$\omega = 15 (TSV - 12). \quad (A.4)$$

TSV : temps solaire vrai (h).

ω : angle horaire ($^{\circ}$).

Le temps solaire :

a) Temps solaire vrai [24] :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} (h)$$

b) Temps solaire moyen [24] :

$$TSM = TSV - E. (h) \quad (A.5)$$

E : est la correction de l'équation de temps en heures.

$$E = \frac{1}{60} [9,87 \sin(2x) - 7,53 \cos(x) - 1,5 \sin(x)]. \quad (A.6)$$

Avec :

$$X = \frac{360}{365}(j-81) \quad (x \text{ en degrés}).$$

j : le numéro du jour de l'année.

a) **Temps universel** [24] :

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (\lambda \text{ en degrés}).$$

b) **Temps légal ou local** [24]:

$$TL = TU + K \text{ (h)}.$$

Calcul des facteurs de formes :

Le facteur de forme est en fait une quantité purement géométrique : il dépend uniquement de la forme et de la position relative des surfaces.

✚ Réciprocité : $\forall (i, j) A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ (I)

✚ La somme de tous les facteurs de forme pour une surface donnée est égale à l'unité.

Soit un environnement clos constitué de n surface A_1, A_2, \dots, A_n . On a donc pour toute surface

A_i de cet environnement (i allant de 1 à n) :

$$\sum_{k=1}^n F_{ik} = 1$$

✚ Dans le cas d'une surface A_i plane ou convexe, aucun rayon lumineux réfléchi par cette surface ne va frapper directement cette même surface. Donc : $F_{ij} \neq 0$

Dans le cas d'une surface A_i concave, on a bien entendu : $F_{ij} \neq 0$

✚ i. Additivité : Soient trois surfaces disjointes A_i, A_j et A_k . La fraction d'énergie issue de A_i et reçue par l'union des deux surfaces A_j et A_k est égale à la somme des fractions d'énergie issues de A_i et reçues par chacune de ces deux surfaces.

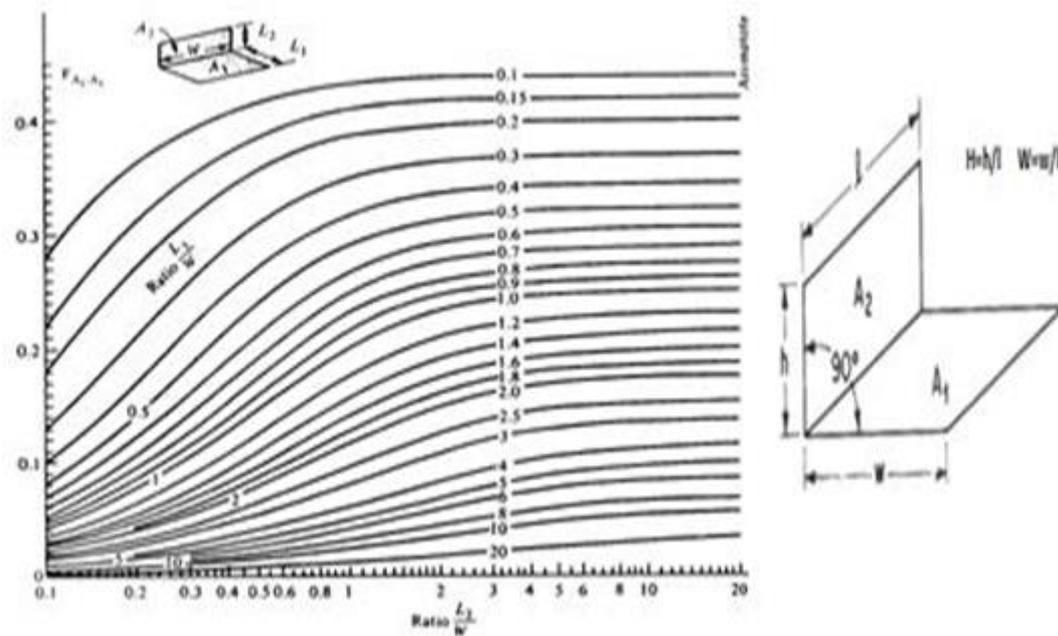


Figure (A.1) : facteur de forme entre deux plaques perpendiculaires avec un segment commun.

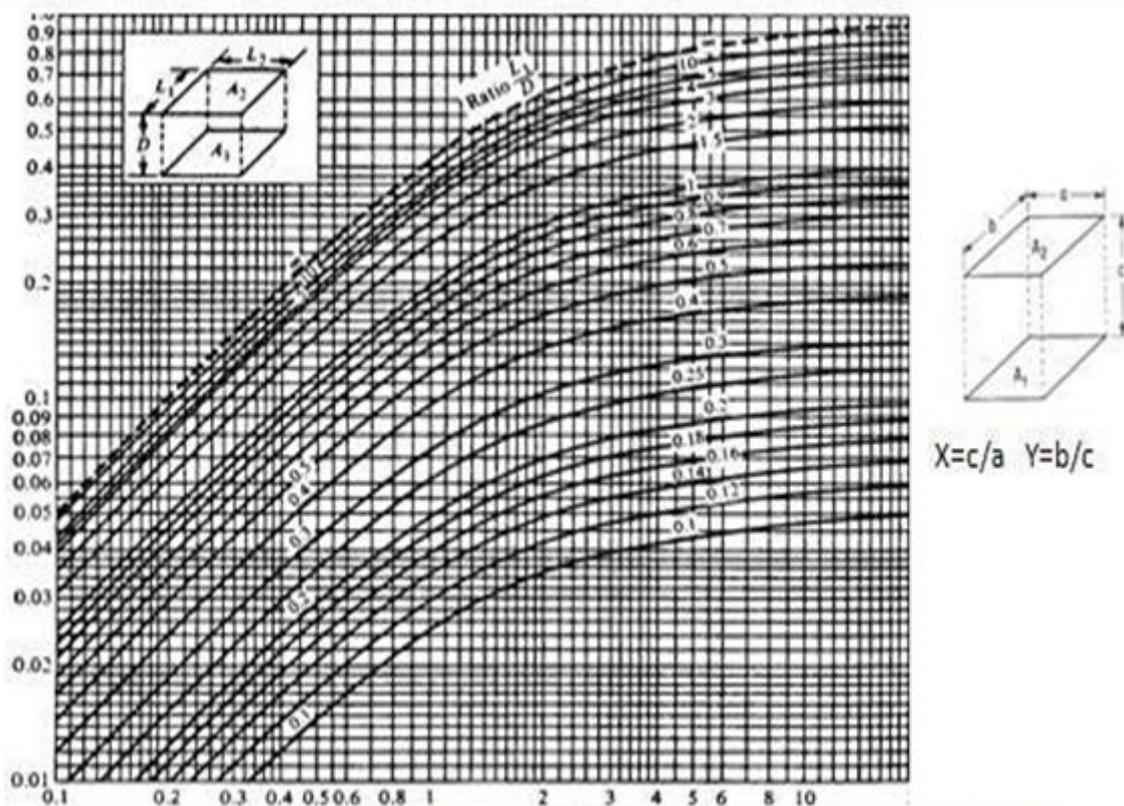


Figure (A.2) : facteur de forme entre deux plaques parallèles.

Toit :

Facteur de formes	Méthode de calcul
$F_{ST}=0.520$	Abaque
$F_{ET}=0.335$	Abaque
$F_{ST}=0.340$	Abaque
$F_{NT}=0.340$	Abaque
$F_{WT}=0.335$	Abaque

Tableau (A.1) : valeurs des facteurs de forme du toit.

Paroi EST :

Facteur de forme	Méthode de calcul
$F_{TE}=0.097$	Abaque
$F_{PSE}=0.092$	Abaque
$F_{PNE}=0.092$	Abaque
$F_{PWE}=0.137$	Abaque
$F_{SE}=0.09$	Abaque

Tableau (A.2) : valeurs des facteurs de forme de la paroi EST.

Paroi NORD :

Facteur de forme	Méthode de calcul
$F_{TN}=0.160$	Abaque
$F_{PEN}=0.130$	Abaque
$F_{PSN}=0.152$	Abaque
$F_{PWN}=0.130$	Abaque
$F_{SN}=0.210$	Abaque

Tableau (A.3) : valeurs des facteurs de forme de la paroi Nord.

Paroi SUD :

Facteur de forme	Méthode de calcul
$F_{TS}=0.120$	Abaque
$F_{PES}=0.130$	Abaque
$F_{PNS}=0.152$	Abaque
$F_{PWS}=0.130$	Abaque
$F_{SS}=0.120$	Abaque

Tableau (A.4) : valeurs des facteurs de forme de la paroi Sud.

Sol intérieur :

Facteur de forme	Méthode de calcul
$F_{TS}=0.520$	Abaque
$F_{PES}=0.335$	Abaque
$F_{PSS}=0.340$	Abaque
$F_{PNS}=0.340$	Abaque
$F_{PWS}=0.335$	Abaque

Tableau (A.5) : valeurs des facteurs de forme du sol intérieur.

Etapes de la simulation :

Après l'importation du fichier « msh. » vers Fluent, la première étape consiste à vérifier le maillage ainsi que les volumes (il ne faut pas avoir de volumes négatifs), ensuite choisir les fluides et les solides nécessaires pour notre étude, donc la fenêtre Define puis Material.

Pour notre cas nous avons choisi l'air humide (species), et les solides sont :

- ▶ verre (Glass) pour le toit et les parois latérales.
- ▶ terre pour le sol.

Le modèle utilisé pour dans cette simulation est k. epsilon

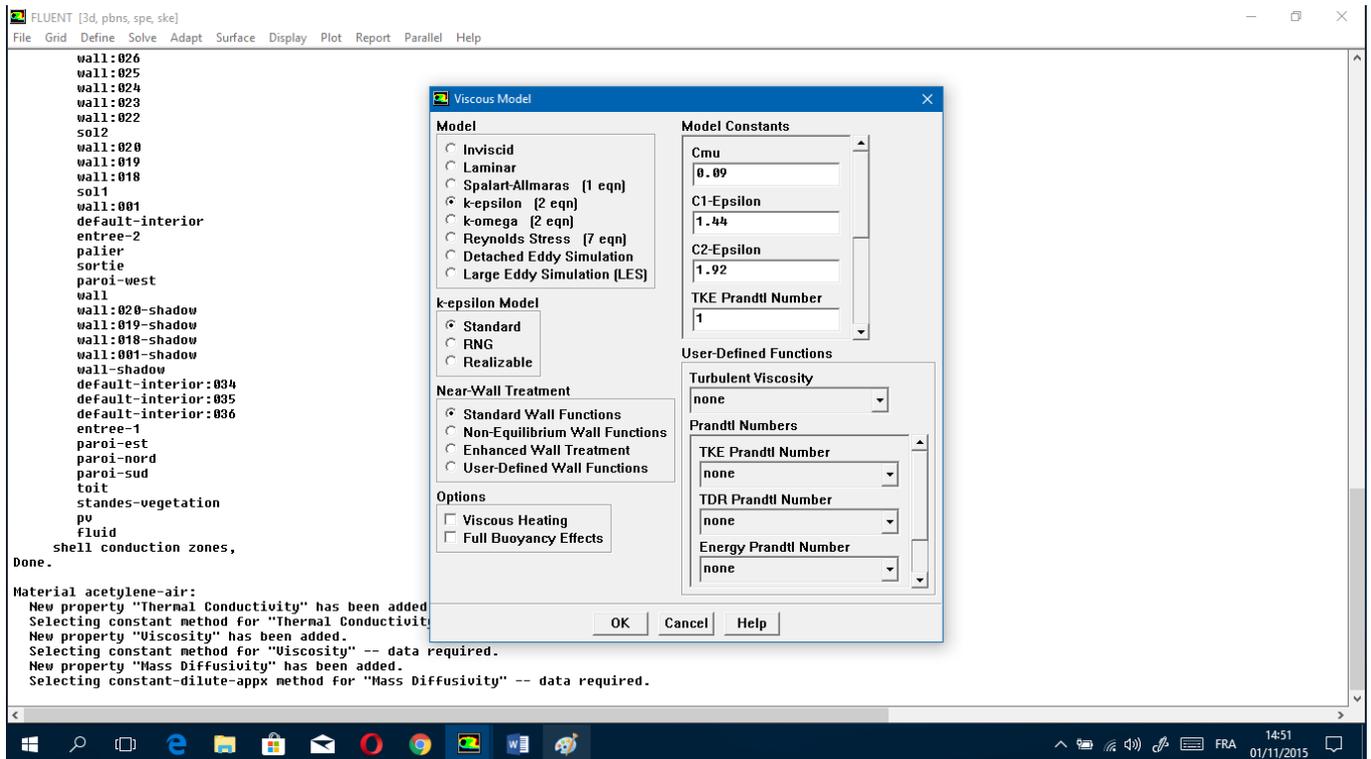


Figure (B.1) : model viscous.

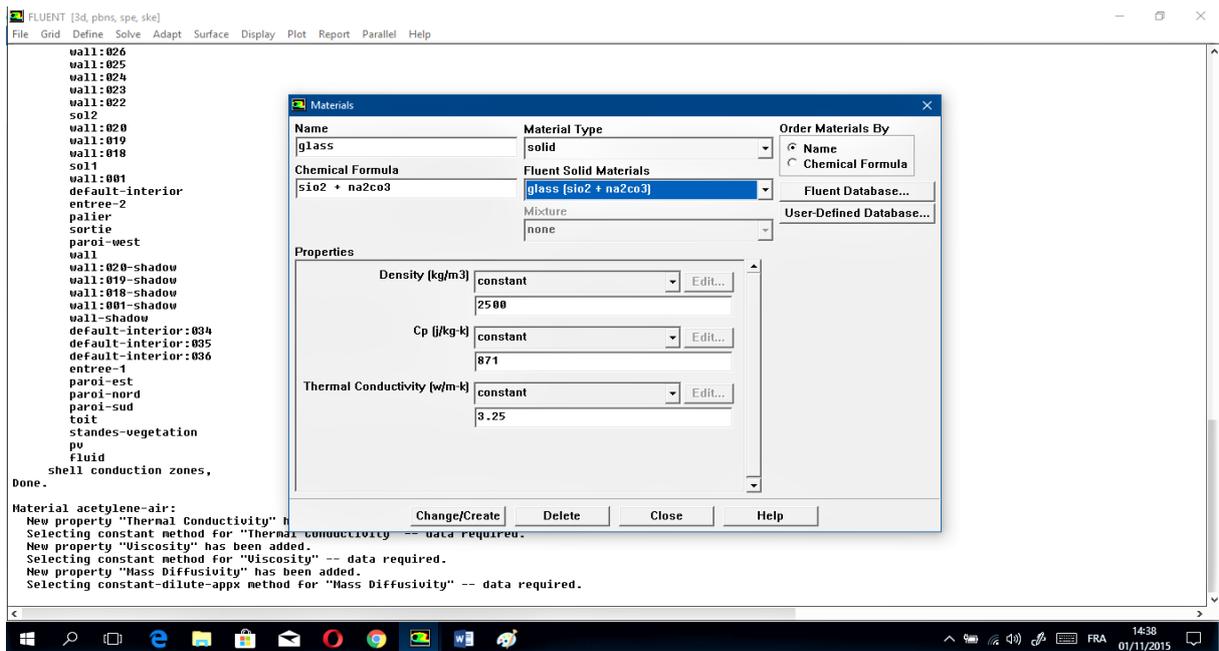
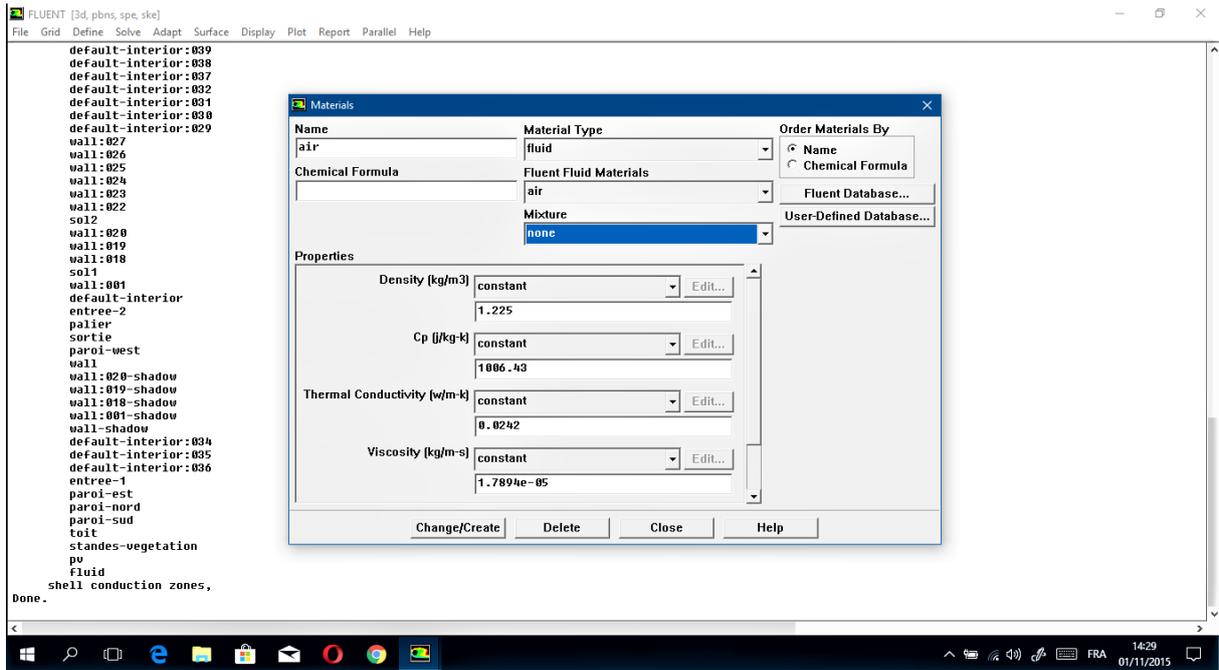


Figure (B.2) : propriétés physiques des fluides et solides mis en jeu dans la serre.

En ce qui concerne les conditions aux limites, nous avons utilisé solid pour le toit et les parois latérales de la serre ainsi que le sol, les flux de chaleur sont introduits par l'interprétation des UDF's.

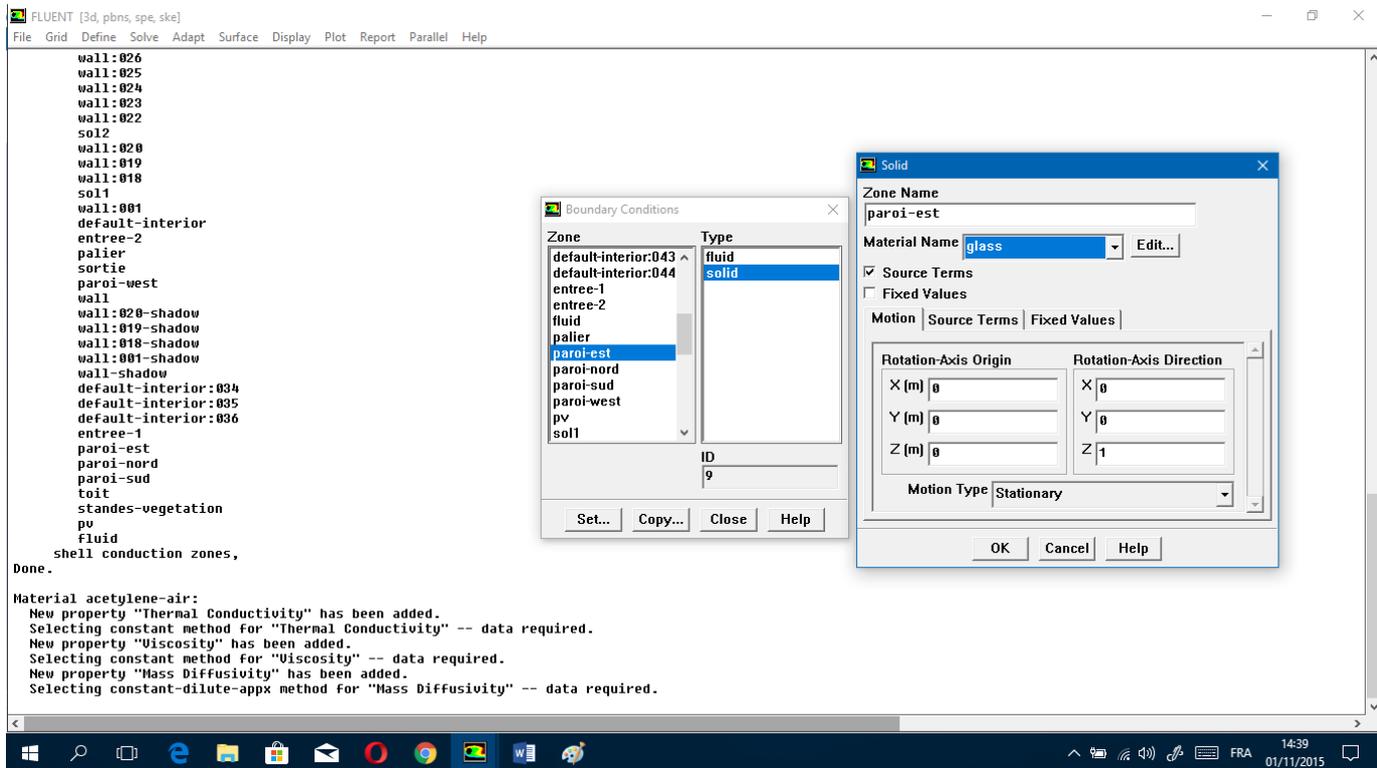
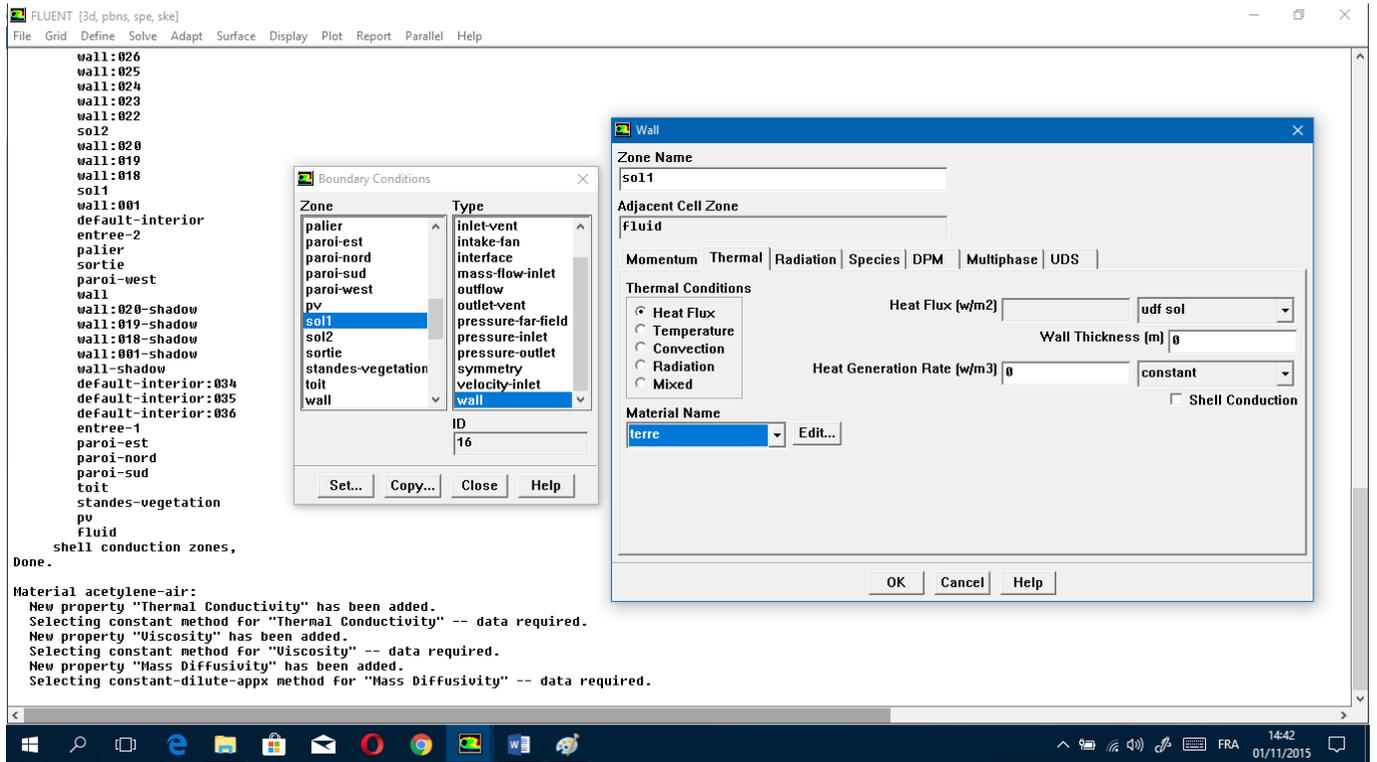
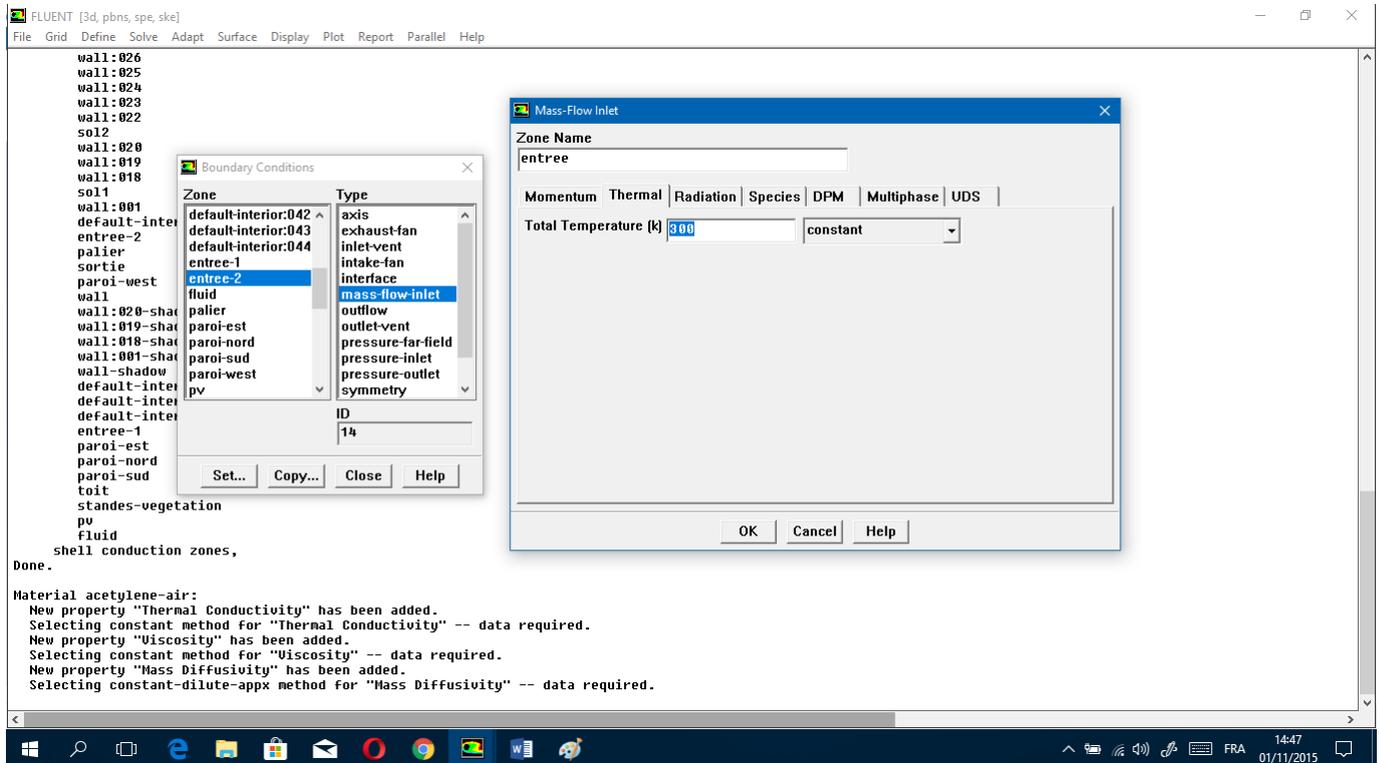
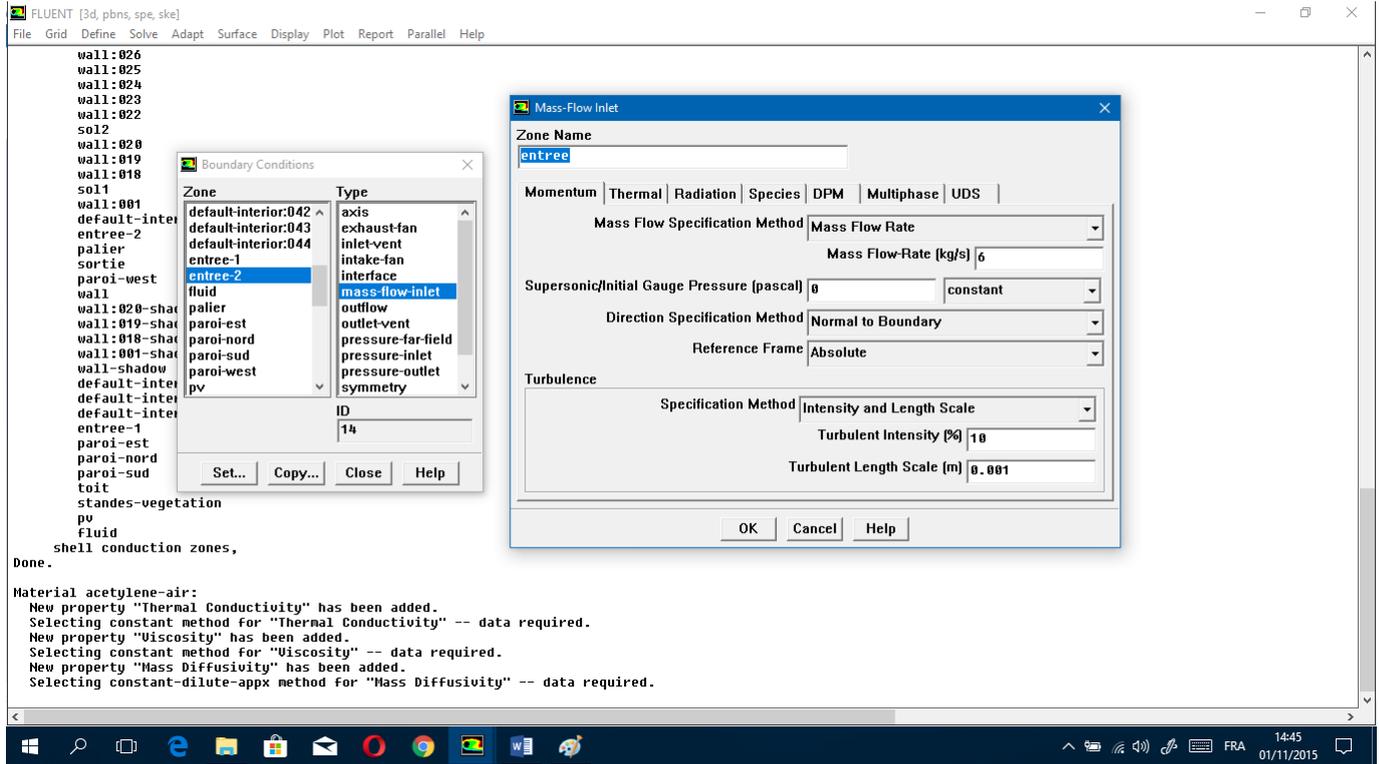


Figure (B.3) : conditions aux limites.

Les conditions d'entrée d'air sont les suivantes :



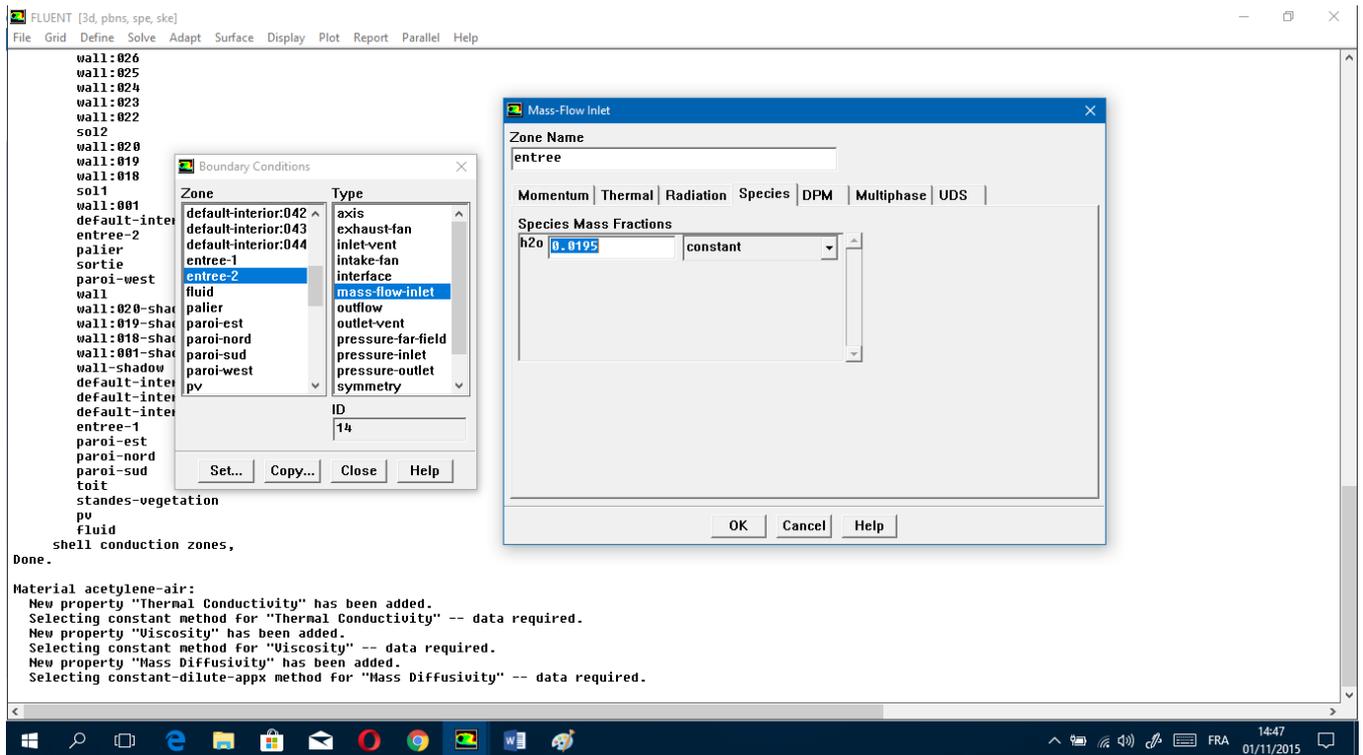
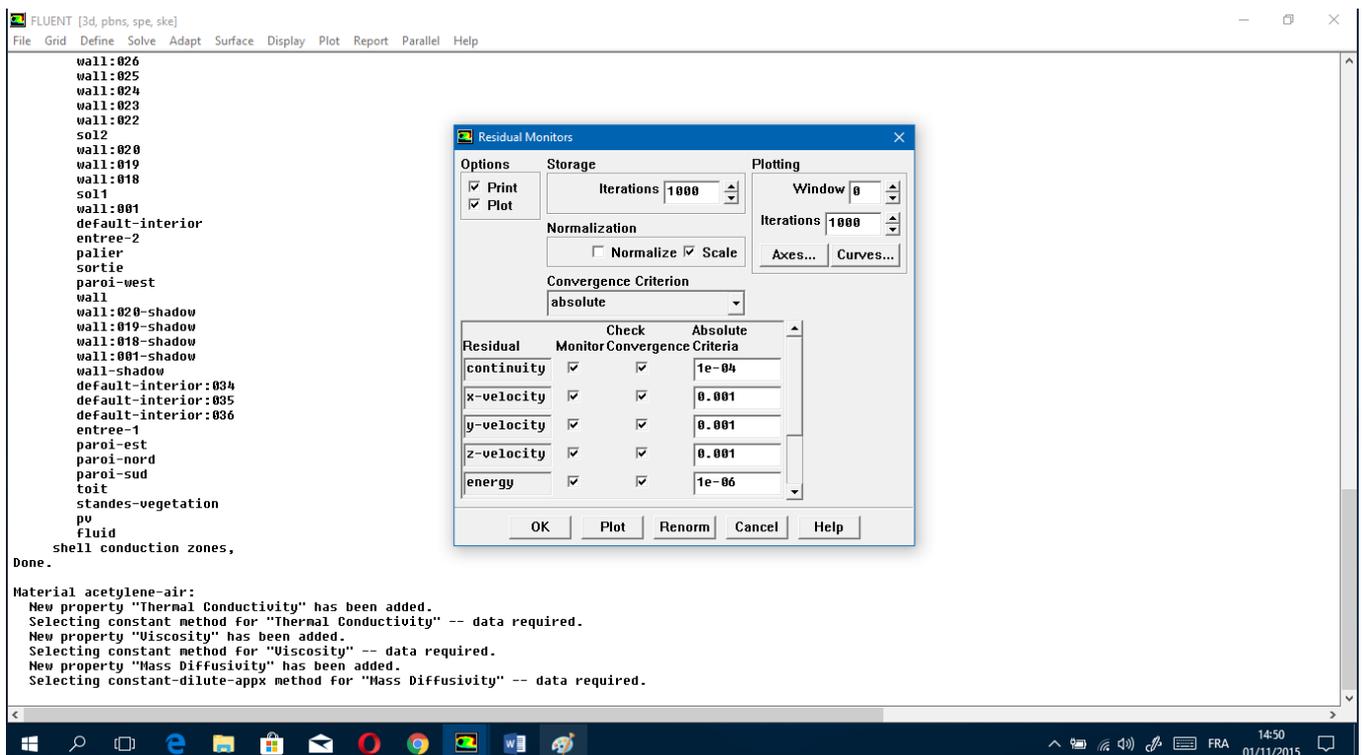
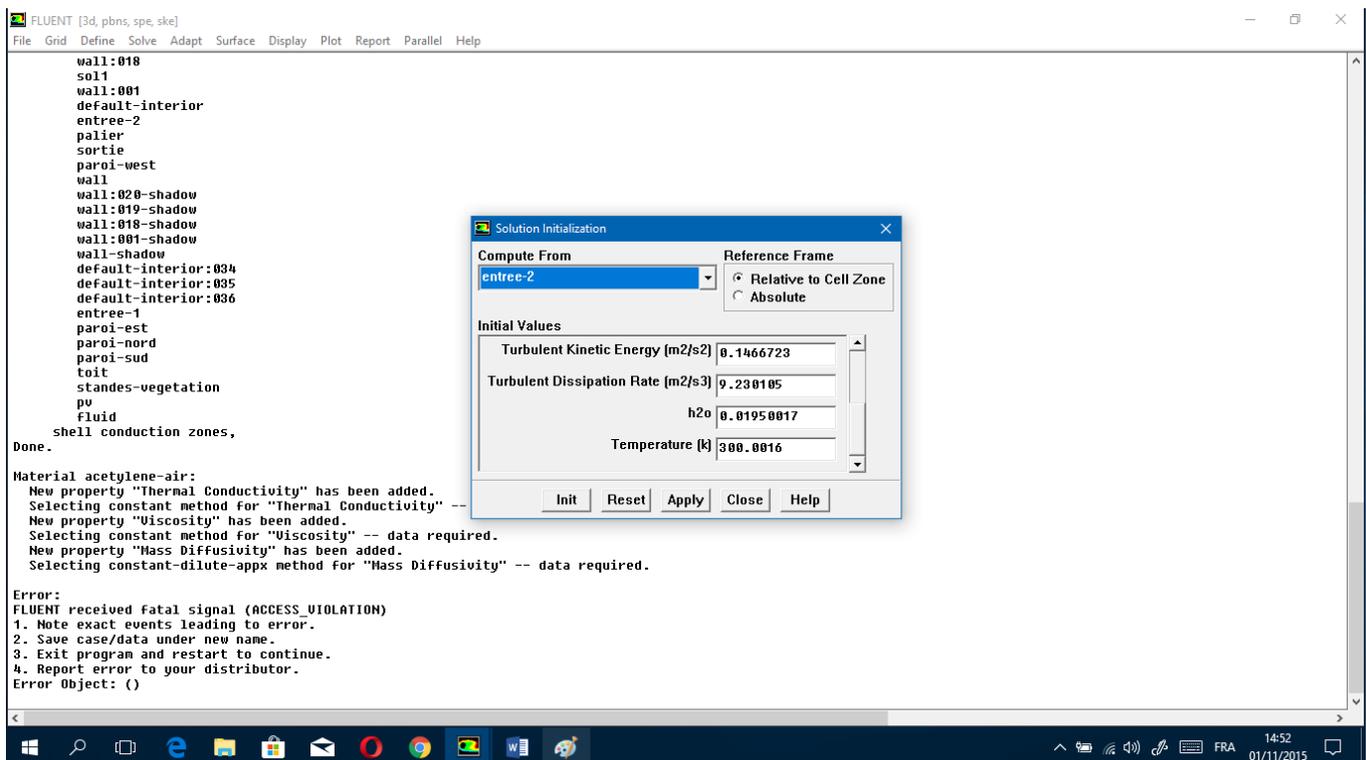
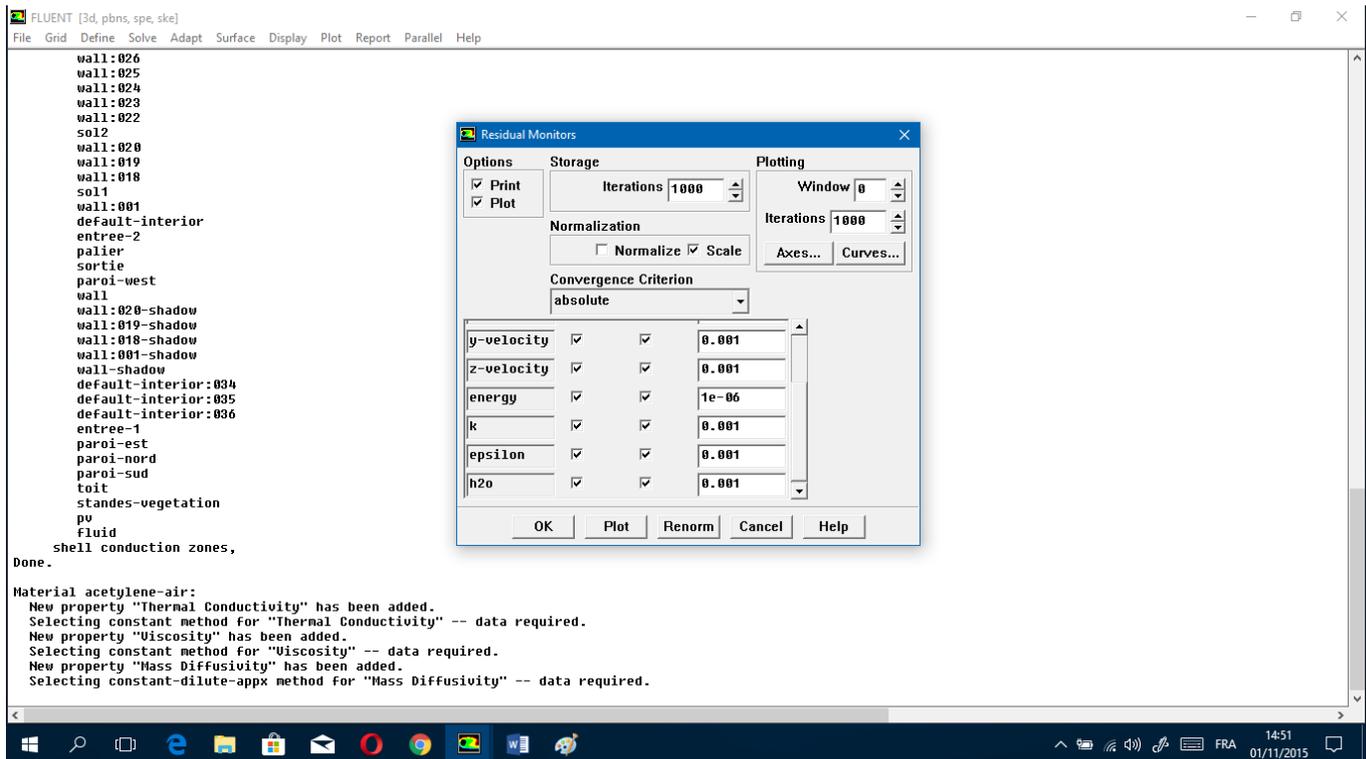


Figure (B.4) : conditions à l'entrée.

On entame alors le processus de calcul en entrant à solver, on fixe les caractères de convergence et on initialise la solution à partir de l'entrée 1 (où l'air est injecté à l'intérieur de la serre).





Après initialisation, on entame la dernière étape qui est la simulation, on commence les itérations jusqu'à convergence de la solution, et enfin on exploite les résultats.

The screenshot displays the ANSYS FLUENT 6.3.3 (3d, pbns, spe, ske) interface. The main console window shows the following text:

```
entree-1
paroi-est
paroi-nord
paroi-sud
toit
standes-vegetation
pv
Fluid
shell conduction zones,
Done.
Material acetylene-air:
New property "Thermal Conductivity" has been added.
Selecting constant method for "Thermal Conductivity" -- data re
New property "Viscosity" has been added.
Selecting constant method for "Viscosity" -- data received
New property "Mass Diffusivity" has been added.
Selecting constant-dilute
Iteration
Number of Iterations 1300
Reporting Interval 1
UDF Profile Update Interval 1
Iterate Apply Close Help
Error:
FLUENT received fatal signal
1. Note exact events leading
2. Save case/data under new
3. Exit program and restart
4. Report error to your dist
Error Object: ()
iter continuity x-velocity
reversed flow in 1490 faces on outflow 12.
Interrupting...
Done.
Reading "C:\Users\AHP CSEB\Desktop\SOURCE-SURFSOL\SIMULSURFSOL-1.5kg-1300.dat"...
Done.
Reading "C:\Users\AHP CSEB\Desktop\air humidifié Rg=1000\SIMULSURFSOL-6kg-1300.dat"...
Done.
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon h2o toit time/iter
1300 1.2664e-05 2.1315e-04 1.5721e-04 1.5713e-04 1.0322e-06 1.5496e-04 2.4442e-04 5.1411e-08 3.3112e+02 0:00:00 1300
Interrupting...
Done.
```

An inset window titled "FLUENT [0] Fluent Inc" displays a residual plot. The legend indicates the following residuals: continuity (red), x-velocity (green), y-velocity (blue), z-velocity (cyan), energy (magenta), k (yellow), epsilon (orange), h2o (purple), and toit (brown). The plot shows residuals on a logarithmic scale from 1e-07 to 1e+01 over 1400 iterations. The residuals for most variables decrease and stabilize between 1e-04 and 1e-05, while the 'toit' residual remains significantly higher at approximately 1e-02.

The Windows taskbar at the bottom shows the system time as 14:56 on 01/11/2015.